



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VÝROBA, POUŽITÍ A VLASTNOSTI NIKLOVÝCH
SLITIN**

MANUFACTURING, USE AND PROPERTIES OF NICKEL ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Kejha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Richard Kejha**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba vlastností a použití niklových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mechanické vlastnosti všech běžných kovů a jejich slitin klesají s rostoucí teplotou. Pro skříňe plynových turbín a dalších součástí pracujících dlouhodobě v rozsahu 450 – 620 °C jsou používány 9 - 12 % chromové oceli. V případě součástí pracujících ještě vyšších teplot jsou používány zejména vysokolegované chromové oceli s feritickou strukturou nebo častěji oceli chromniklové austenitické. Nevýhodou austenitických ocelí bývají zejména nižší hodnoty meze pevnosti a meze kluzu. Austenitické oceli jsou používány až do teploty cca 1200 °C. V těchto ocelích se obsah niklu pohybuje až do koncentrace 50 hmotnostních % a železo je již minoritním prvkem. Niklové slitiny jsou používány na tepelně nejvíce exponované části spalovacích turbín, turbokompresorů, součástí v energetice a petrochemii. Obsah niklu v těchto slitinách bývá 50 až 80 % a tyto slitiny jsou dále legovány chromem, molybdenem, vanadem, titanem, hliníkem a dalšími prvky, které v důsledku tvorby intermetalických fází, stabilních karbidů, nitridů, karbonitridů příp. boridů zajišťují vysoké mechanické hodnoty těchto slitin i za teplot blízkých teplotě solidu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést literární rešerši o niklových slitinách používaných pro součásti pracující dlouhodobě za teplot nad 600 °C. V rámci bakalářské práce provést základní rozdělení jednotlivých představitelů niklových slitin s popisem jejich struktury a mechanických i fyzikálních vlastností za normálních a zvýšených teplot.

Seznam literatury:

ROUČKA, J., P. ŇUKSA. Ovlivnění krystalizace rotorů turbodmychadel ze slitin niklu. In 50.slévárenské dny, Sborník přednášek – sekce přesného lití. Brno: Česká slévárenská společnost.12.–13. 11. 2013. Brno, s. 6–13. ISBN 978-80-02-02493-4.

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. Book 511, Cambridge UK. 1995. 474 s. ISBN 0-901716-66-9

PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, 2002. 396 s. ISBN 80-7204-248-3

ZEMČÍK, L. Speciální slévárenské procesy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1987. 125 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, Csc.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

KEJHA Richard: Výroba, použití a vlastnosti niklových slitin

Práce předkládá literární rešerši s problematikou zaměřenou na průmyslové využívané niklové slitiny, zvláště pak na slitiny žáruvzdorné a žárovevné. V práci jsou popsány základní tržní značky konstrukčních, žárovevných a žáruvzdorných slitin a jejich vybraní představitelé. Dále jsou uvedeny základní vlastnosti daných materiálů a jejich přibližné porovnání. Základními konstrukčními slitinami jsou monelové slitiny na bázi Ni-Cu, které dosahují velice dobrých mechanických vlastností a výborné korozní odolnosti. Materiály žáruvzdorné a žárovevné jsou většinou na bázi Ni-Cr či Ni-Cr-Fe a jejich mechanické vlastnosti jsou velice rozdílné jak za běžných podmínek, tak i za vysokých provozních teplot, protože bývají využity různé druhy legujících prvků a jejich koncentrací. Tyto slitiny jsou obvykle legovány prvky jako W, Cu, V, Al, Nb, Ti, Ta, Mo, Co, Zr, B.

Klíčová slova: nikl, superslitiny, korozivzdornost, žárovevnost, žáruvzdornost

ABSTRACT

KEJHA Richard: Manufacturing, use and properties of nickel alloys

This thesis presents a literary recherche of matters concerning on industrial use of nickel aluminates, especially on refractory and incandescent alloys. In this dissertation are written basic market brands of constructional, refractory and incandescent alloys, and then their selected representatives. There are listed the basic properties of given materials and their approximate comparison. The basic constructional materials are monel alloys based on Ni-Cu, which achieves very good mechanical properties and excellent corrosion resistance. Refractory and incandescent materials are mostly based on Ni-Cr or Ni-Cr-Fe. Their mechanical features are very different in normal conditions and even in high operating temperatures because there are used different kinds of addition elements and their concentration. These alloys are usually additioned by elements like W, Cu, V, Al, Nb, Ti, Ta, Mo, Co, Zr, B.

Keywords: nickel, superalloys, corrosion resistance, heat resistance, refractory

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KEJHA, R. *Výroba, použití a vlastnosti niklových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 26.5.2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Antonínu Záděrovi Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 NIKL	10
1.1 Výroba a použití niklu	10
1.2 Slitiny niklu	11
2 KONSTRUKČNÍ SLITINY	12
2.1 Monely	12
2.1.1 Monel-400	12
2.1.2 Monel R-405	13
2.1.3 Monel K-500	13
2.2 Slitiny Ni-Be	14
2.3 Ostatní konstrukční slitiny	15
3 SLITINY ŽÁRUVZDORNÉ A ŽÁRUPEVNÉ	16
3.1 Charakteristika	16
3.2 Chemické složení a mikrostruktura	18
3.2.1 Fáze γ	18
3.2.2 Fáze γ'	18
3.2.3 Fáze γ''	19
3.2.4 Karbidy v superslitinách	19
3.2.5 Mikrostruktura superslitin	20
3.3 Slitiny NIMONIC	21
3.3.1 NIMONIC 75	21
3.3.2 NIMONIC 80A	22
3.3.3 NIMONIC 86	22
3.3.4 NIMONIC PE16	23
3.4 Slitiny INCOLOY	24
3.4.1 INCOLOY 800, 800H, 800HT	25
3.4.2 INCOLOY 20	26
3.4.3 INCOLOY 945, 925, 945X	26
3.5 Slitiny HASTELLOY	27
3.5.1 HASTELLOY C – 22	28
3.5.2 HASTELLOY C-276	28
3.5.3 HASTELLOY X	29
3.5.4 HASTELLOY C-263	30
3.6 Slitiny INCONEL	31
3.6.1 INCONEL 600	31
3.6.2 INCONEL 625	31

3.6.3 INCONEL 718	32
3.6.4 INCONEL X-750.....	33
3.6.5 INCONEL 713, IN 713 LC.....	34
3.6.6 INCONEL 738, IN 738 LC.....	34
3.6.7 INCONEL 792 (5A).....	35
4 SLITINY Ni SE ZVLÁŠTNÍMI FYZIKÁLNÍMI VLASTNOSTMI.....	37
4.1 Termočláňkové slitiny	37
4.2 Odporové slitiny Ni.....	37
4.3 Magneticky měkké slitiny Ni.....	37
5 ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	39
POUŽITÁ LITERATURA.....	40

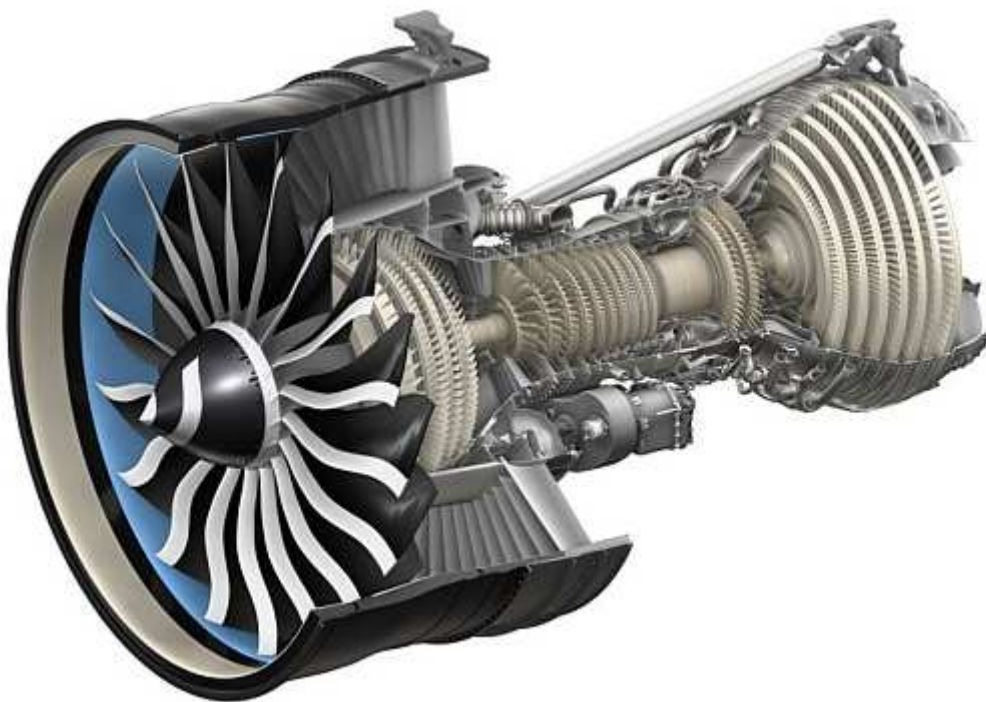
ÚVOD

Niklové slitiny zahrnují velkou škálu materiálů. Běžně se dají rozdělit na slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a slitiny žáruvzdorné a žárupevné. Konstrukční niklové slitiny mají lepší korozní odolnosti a mechanické vlastnosti v některých atmosférách než běžně používané oceli a jsou využívány především v takovýchto prostředích. Slitiny se zvláštními vlastnostmi jsou používány výhradně v případech, kdy se vyžadují speciální chemicko-fyzikální vlastnosti, jako jsou stálá permeabilita či vysoký elektrický odpor.

Slitiny žárupevné a žáruvzdorné jsou materiály, které po určitou dobu odolávají creepu, vysokocyklové, nízkocyklové i tepelné únavě a oxidaci za běžných i vysokých teplot. Ze začátku se jejich využití vztahovalo především k letecké (bojové) a raketové technice. Dnes je jejich využití velice rozšířené a zahrnuje petrochemický, jaderný, kosmický, chemický, letecký průmysl aj. Využívají se v případech, kdy již nejsou použitelné vysoce legované korozivzdorné oceli. Hranici použitelnosti ocelí je teplota asi 650°C. Nad touto teplotou se již využívají zpravidla plně austenitické oceli, titanové a právě niklové slitiny.

Niklové slitiny patří mezi velice drahé konstrukční materiály, protože využívají drahých legujících prvků, jako jsou vlastní nikl a dále wolfram, kobalt, vanad, titan, niob, molybden, tantal popřípadě prvky jako bor, cer, zirkonium, thorium či yttrium.

Cílem bakalářské práce je vytvořit literární rešerši, která obsahuje rozdělení a charakteristiku niklových slitin, jejich mechanické, technologické, korozivzdorné a fyzikální vlastnosti za běžných i zvýšených teplot. Práce se týká především žáruvzdorných a žárupevných materiálů, slitiny konstrukční a zvláště pak slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi jsou uvedeny pouze okrajově.



Obr. 1.: Proudový motor GEnx od firmy GE Aviation^[27]

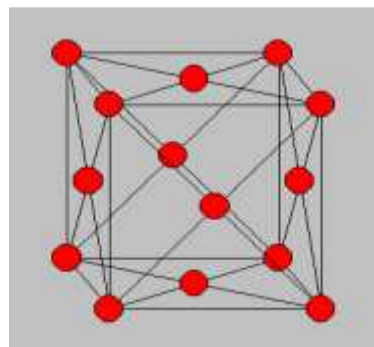
1 NIKL

Nikl je feromagnetický, kujný a tažný kov bílé barvy. Je dobrým vodičem tepla a elektřiny. Je měkký a dá se výborně leštit. Za běžných podmínek je nikl poměrně stálý (tvorba tenké pasivační vrstvy na povrchu, která brání dalšímu šíření koroze) jak vůči působení vody, tak i na vzduchu a je značně odolný proti alkáliím. Za zvýšených teplot velice dobře pohlcuje vodík. Jemně rozptýlený nikl je na vzduchu samozápalný. Běžně krystalizuje s mřížkou kubickou plošně středěnou (FCC – **obr. 2**). Čistý nikl je pro člověka toxický.^{[21],[17]}

V přírodě je poměrně hojně zastoupen. Nevyskytuje se jako čistý prvek, ale jako směs se železem ve formě oxidů (laterit viz. **Obr. 3**, garnierit) nebo jako sulfid nikelnato-železitý (pentlandit). Vyskytuje především ve stálých sloučeninách v mocenství Ni^{+2} , Ni^{+1} a Ni^0 , nalézt ho lze i v látkách jako Ni^{+3} , tyto látky jsou ovšem nestabilní a působí silně oxidačně. Největším nalezištěm niklových rud je kanadské Sudbury v provincii Ontario, dále pak Rusko, Nová Kaledonie či Austrálie. Odhaduje se, že velké množství niklu je soustředěno v jádru Země.^{[21],[17]}

Základní fyzikálně chemické vlastnosti niklu:^[21]

Chemická značka:	- Ni (lat. Niccolum)
Relativní atomová hmotnost:	- 58,69 [g/mol]
Atomové číslo:	- 28
Tvrdost (Moshova stupnice):	- 4
Hustota:	- $\rho = 8,90 \text{ [g/cm}^3\text{]}$
Teplota tání:	- $T_T = 1\,455 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Tepelná vodivost (20 °C):	- $\lambda = 90,9 \text{ [W/(m} \times \text{k)]}$
Elektrická vodivost (20 °C):	- $G = 1,4 \times 10^7 \text{ [S/m]}$



Obr. 2: FCC mřížka^[17]

1.1 Výroba a použití niklu

Výroba niklu je složitý proces, který závisí na druhu použité rudy. Při výrobě se vždy v konečné fázi získává NiO, který se za pomoci koksu redukuje na čistý nikl. Získaný kov ale nebývá čistý natolik, aby se dal spolehlivě použít k pro legování ocelí nebo pro výrobu vlastních slitin, které mají většinou úzce předepsané chemické složení. Obvykle se dále nikl pročišťuje elektrolýzou, kdy se na anodě vylučuje surový nikl a na katodě nikl rafinovaný (čistý). Nikl s čistotou kolem 99,97 % se vyrábí tzv: Mondovým procesem, kdy se oxidy niklu redukují vodíkem na surový kov a při následné reakci s oxidem uhelnatým vzniká tetrakarbonil niklu. Ten se při teplotě 230 °C rozkládá na čistý nikl a oxid uhelnatý.^{[21],[17]}



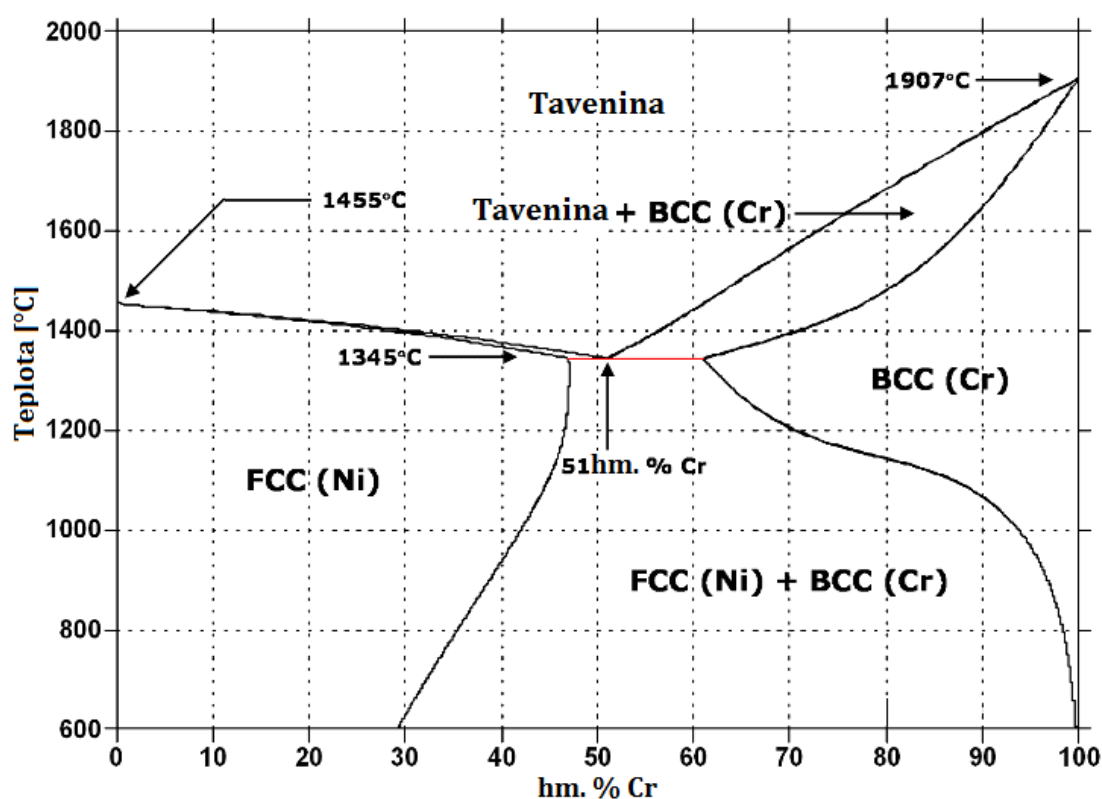
Obr. 3: Lateritová ruda niklu - $(\text{Fe,Ni})\text{O}(\text{OH})$ ^[17]

Nikl patří spolu s chromem a manganem mezi základní kovy, které slouží pro legování ocelí. Největší množství vyráběného niklu se přidává do korozivzdorných ocelí a to asi 60% vyráběného množství. Dále asi 25% připadá na výrobu vlastních legovaných slitin. Pro svou dobrou stálost vůči atmosférickým vlivům, vodním vlivům a alkalickým roztokům se užívá k pokovování (zvláště oceli) a k výrobě chemického nádobí. Dále se uplatňuje v elektrotechnice (termočlánky, regulační odpory, baterie,...) a na výrobu mincí, barvení skla aj...^{[13],[17]}

1.2 Slitiny niklu

Niklové slitiny jsou pro moderní průmysl životně důležité, protože jsou schopny odolávat těžkým pracovním podmínkám, které zahrnují vysoce korozní prostředí, vysoké provozní teploty a namáhání. Využívají se především materiály na bázi Ni-Cu, Ni-Fe, Ni-Cr, Ni-Mo či Ni-Co, popřípadě jejich kombinace. Nikl tvoří s mědí binární diagram s úplnou rozpustností a s železem s diagram s téměř úplnou rozpustností. Rozpustnost chromu je asi 30% (**obr. 4**), Legování dalšími prvky se provádí pro výrazné zpevnění materiálu, díky možnosti vytvrzení. Za těmito účely se do slitin přidávají prvky jako hliník, titan, niob, tantal (podrobnější popis viz kapitola 3). Slitiny niklu mají klasicky vysoký elektrický odpor, houževnatost, pevnost, odolnost proti korozi, žáruvzdornost a žáropevnost. Těmito vlastnostmi předčí všechny druhy neželezných i železných slitin. Obvykle se rozdělují podle použití na: ^{[5],[17],[2],[8]}

- **Slitiny Konstrukční,**
- **Slitiny žáruvzdorné a žáropevné,**
- **Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.**



Obr. 4.: Rovnovážný binární diagram Ni-Cr^[23]

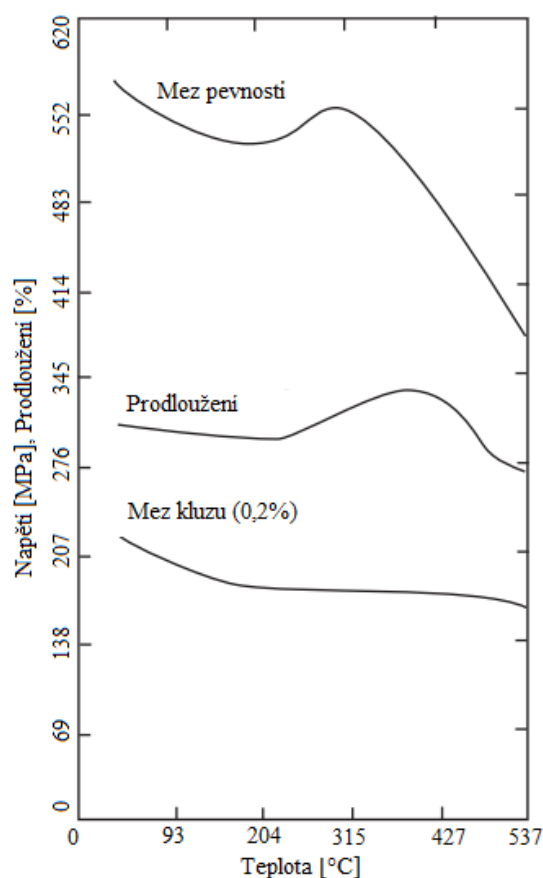
2 KONSTRUKČNÍ SLITINY

2.1 Monely

U monelů se jako hlavního legujícího prvku používá měď a to kolem 27-34%. Měď a nikl jsou vzájemně plně rozpustné a tvoří tak binární jednofázovou slitinu. Dalšími základními prvky jsou železo, uhlík, mangan a křemík. Nevyhnutelný je výskyt nežádoucí síry ve slitině, která se ve slitinách vyskytuje na hranicích zrn jak vměstky a zmenšuje tak mechanické vlastnosti. Síra se eliminuje pomocí manganu a její výsledné hodnoty se liší vzhledem k vyrábění slitině. Nejvyšší hodnoty jsou asi 600ppm a nejnižší potom sahají pod 100ppm. Dalším legujícím prvkem může být hliník, tyto slitiny jsou potom vytvrditelné a jejich pevnost dosahuje až 1 400 MPa, zatímco monely legované pouze Fe, Mn a Si v závislosti na tepelném zpracování a obsahu prvků dosahují pevností 500-1200 MPa. Slévárenské monely mají oproti tvářeným vyšší obsah Si většinou 3-4%. Pro průmyslové využití se používají zejména 3 druhy monelů a to Monel-400, Monel R-405 a Monel K-500^{[5],[18],[17],[14]}

2.1.1 Monel-400

Tato slitina se vyznačuje vysokou pevností a vynikající odolností proti korozi v atmosféře, mořské vodě, páře, proti kyselině fluorovodíkové, sírové a zásaditým kyselinám. Jak uvádí literatura[14] jedná se dost možná o nejkorozivzdornější slitinu mezi běžně používanými průmyslovými materiály. Dále má velmi dobrou tažnost a svařitelnost. Dobře vede teplo a má dobrou kujnost. Vykazuje výborné vlastnosti za teplot za nízkých teplot. Díky svým korozním vlastnostem, svařitelnosti a pevnosti se využívá v petrochemickém průmyslu na potrubní konstrukce a čerpadla pro dopravu ropy či plynu z mořských hlubinných vrtů. Užitečná je též na lodní konstrukce. Do teplot asi 540°C (**obr. 5**) vykazuje dobré creepové vlastnosti a odolává oxidačním prostředím, díky tomu se používá na lopatky turbín a v jaderném průmyslu pro výrobu částí primárních obvodů a reaktoru. Významnou část využití tvoří také průmysl farmaceutický, potravinářský a chemický. Monel-400 se může zpracovávat odléváním, ale největší část výroby tvoří slitiny tvářené za tepla a za studena. Při tváření za tepla se musí dbát na jeho teplotní odolnost. Jelikož je tento materiál měkčí než většina ocelí, dá se za tepla tvářet do téměř jakéhokoli tvaru. Důležitou roli hraje použití vhodné teploty, ta se klasicky pohybuje mezi 650-1150°C. Pro velké redukce se doporučuje teplot kolem 930-1150°C, pro malé redukce i teploty pod 950°C. Zpracovávání za nižších teplot dodává materiálu vyšší mechanické vlastnosti a menší velikost zrna. Tvářet za studena se dá téměř jakýmkoli způsobem, je to také jediná možnost jak materiál vytvrzovat (**obr. 7**). Polotovary se běžně dodávají jako trubky, tyče, dráty, plechy, tabule, svítky, pásy aj...^{[18],[14]}



Obr. 5.: Mechanické vlastnosti slitiny Monel – 400 v závislosti na teplotě^[14]

Tab.1.: Chemické složení popsaných slitin značky Monel^[18]

Prvek	[%]	[%]	Maximální obsahy [%]						
	Ni	Cu	Fe	Mn	C	S	Si	Al	Ti
Monel-400	Min. 63	28-34	2,5	2,0	0,30	0,024	0,5	-	-
Monel-405	Min. 63	28-34	2,5	2,0	0,30	0,025- 0,600	0,5	-	-
Monel K-500	Max. 63	27-33	2,0	1,5	0,25	0,010	0,5	2,30- 3,15	0,35- 0,85

2.1.2 Monel R-405

Chemické složení slitiny je téměř stejné jako materiálu Monel-400, až na zvýšený obsah síry (**tab. 1**). Díky tomuto faktu je Monel R-405 daleko lépe obrobitelný. Dá se tvrdit, že materiál slouží přímo pro obrábění na soustružnických automatech (**obr. 6**), i když výsledný povrch nemá obvykle tak dobrou drsnost jako Monel-400. Korozivzdornost, svařitelnost a fyzikální vlastnosti jsou takřka nezměněny, malý rozdíl se projevuje v mechanických vlastnostech. Výroba a zpracování jsou totožné, s tím rozdílem, že tento materiál není doporučován pro zpracování kování. Využívá se pro tepelné výměníky, ropné rafinerie, produkci jaderného paliva, v továrnách na kyselinu sírovou atd...^{[18],[14]}



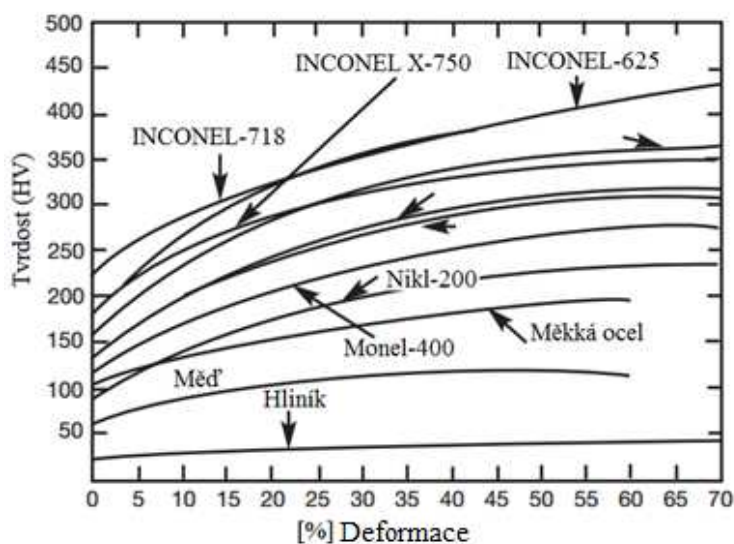
Obr. 6.: Ventil vyrobený ze slitiny Monel-405^[25]

2.1.3 Monel K-500

Tato slitina velice dobře kombinuje výbornou korozní odolnost s vyšší pevností a tvrdostí (**tab. 2**), kterých dosahuje legováním základní matrice hliníku a titanu s následným tepelným zpracováním, díky kterému vznikají v matrici precipitační fáze Ni_3Al a Ni_3Ti . Pro běžnou praxi jsou doporučovány 3 způsoby vytvrzování materiálu v závislosti na požadovaných vlastnostech:

- Pro měkký materiál (140-180 Brinell, 75-90 Rockwell B)
- Pro materiál mírně tvářený za studena (175-250 Brinell, 8-25 Rockwell C)
- Pro materiál plně tvářený za studena (260-325 Brinell, 25-35 Rockwell C)

Podrobnější popis tepelného zpracování viz. Literatura [14]



Obr. 7.: Vliv tváření za studena na tvrdost^[14]

Korozní vlastnosti slitiny jsou téměř stejné jako u Monelu-400. Bylo ovšem zjištěno, že dobře snáší také kyselé prostředí plynů. V některých prostředích ovšem prokazuje napět'ově-korozní praskání. K-500 se zpracovává hlavně tvářením, jak za studena, tak i za tepla. Doporučované teploty pro tvářením za tepla jsou prakticky totožné jako v předchozích případech. Ochlazování by mělo probíhat na vzduchu a z teploty vyšší než 790°C. Pro tvářením za studena se doporučují všechny technologie, dbát se musí ovšem na tvářecí síly, které musí být u takového materiálu značně vysoké. Napříč tomu má slitina K-500 výbornou tažnost. Tvářením za studena samozřejmě způsobuje zpevnění materiálu (**Obr. 7**). Co se týče obrábění, nejlépe se opracovává K-500 tvářením za tepla, nutno konstatovat, že vytvrzený materiál se dá obrábět uspokojivě jen operacemi třetího sledu, kde se dá dosáhnout dobrých povrchů a tolerancí. Zajímavou vlastností této slitiny je její nemagnetičnost a to do teplot kolem -38°C. Využití je opět podobné jako u slitin popsanych výše, možno dodat, že jako materiál tvrdý, pevný a velice dobře odolný proti korozi se využívá na lékařské nástroje (skalpely, stenty,...) a v elektrotechnice.^{[18],[14]}

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti slitin značky Monel.^[10]

Slitina	R _m [MPa]	R _{e0,2} [MPa]	Prodloužení [%]	Tvrđost HRB
Monel 400	517-620	172-345	35-60	60-80
Monel 405	482-586	172-275	35-50	60-76
Monel K-500	621-758	276-414	25-50	75-90

Pozn.: Hodnoty uvedeny pro žíhané tyče

2.2 Slitiny Ni-Be

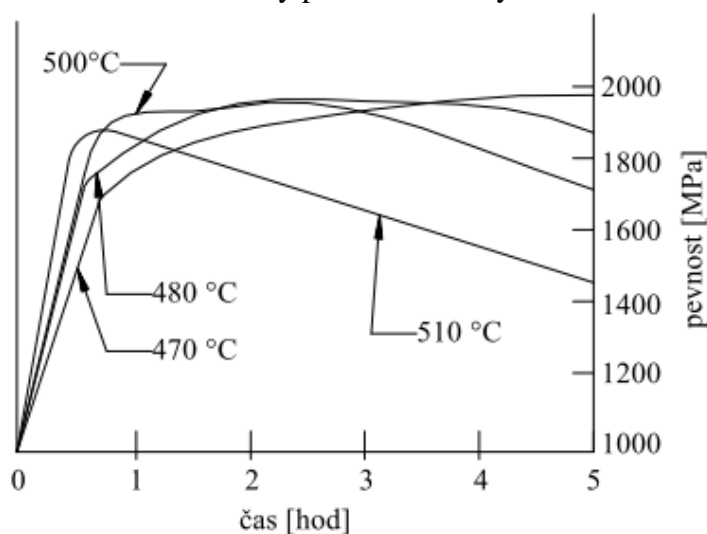
Tyto konstrukční slitiny obsahují do 2% Berylia, do složení 1% Be se dají precipitačně vytvrzovat až k hranici pevnosti 2000MPa při zachování dobré houževnatosti. Klasickým představitelem může být **Ni-Be 360**:

Tato slitina vyniká vysokou pevností v tahu a to až 2000MPa, mezí kluzu až 1650 MPa, vynikající tvárností, únavovou pevností 586-655 MPa (při reverzním ohýbání) na 10 miliónů cyklů.

Vytvrzování probíhá velice jednoduchým tepelným zpracováním. Ohřev na teplotu 480-510 °C a výdrž zde asi 1,5 až 2,5hod (**Obr. 9**). Většinou se tak provádí přímo na vzduchu, ale pro případy, kdy je požadován čistý a lesklý povrch se může využít ochranych atmosfér. Slitina se využívá především pro mechanické, elektrické a elektronické komponenty, které jsou vystaveny zvýšeným teplotám do 370 °C po krátkou dobu, jako jsou termostaty, konektory, měchy pružiny, membrány, formy pro vstřikování plastů.^{[17],[15],[22]}



Obr. 8.: Svitky plechu ze slitiny Ni-Be^[22]



Obr. 9.: Graf závislosti pevnosti na teplotě a času vytvrzování^[22]

2.3 Ostatní konstrukční slitiny

Zbylé konstrukční materiály tvoří malou část produkce celé skupiny niklových slitin a jako čisté se používají málo, většinou jsou používány jejich sloučeniny s dalšími prvky, které jsou známy jako superslitiny, proto jim nebude věnována velká pozornost a jejich charakteristika bude pouze okrajová.

Slitiny Ni-Mn

Tyto slitiny obsahují různý obsah manganu v desítkách procent. Dalšími přídatnými prvky mohou být Křemík a Chrom. Mají výbornou odolnost vůči korozi za vyšších teplot v sirnatých prostředích. Používají se klasicky na elektrody zapalovacích svíček (**obr. 10**). Pro příklad firma American Elements vyrábí 3 druhy těchto slitin, jsou to NI-MN-01-P.25MN (75% Ni, 25% Mn), NI-MN-01-P.08MN (92% Ni, 8% Mn) a NI-MN-01-P.05MN (95% Ni, 5% Mn).



Obr. 10.: Zapalovací svíčka značky BRISK s elektrodami z niklové slitiny Ni-Mn^[9]
^{[13],[17],[5],[19]}

Slitiny Ni-Al

Klasické složení materiálu s několika % Al a desetinami % Ti nabízí možnost precipitačního vytvrzování slitiny a vznik fáze γ' (Ni_3Al), tím je možné získat pevnost až 1350 MPa. Materiál má přitom korozní vlastnosti téměř stejné jak čistý nikl. Vhodný pro výrobu pump, hřídelí či oběžných kol. Běžným představitelem může být Duranickel 301.^{[17],[2]}

Slitiny Ni-Mo, (Ni-Si)

Slévárenská slitina, která může obsahovat až 35% Molybdenu (až 10% v případě křemíku). Na povrchu tvoří silnou pasivační vrstvu, která odolává horké i studené kyselině sírové, kyselině chlorovodíkové a dalším chloridům. Používá se výhradně v chemickém průmyslu.^{[13],[17],[5]}

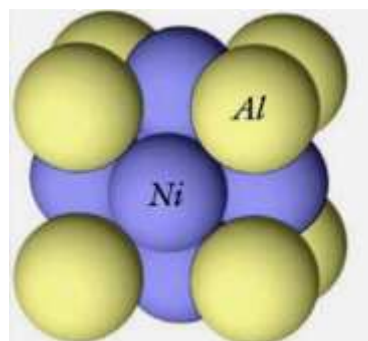
3 SLITINY ŽÁRUVZDORNÉ A ŽÁRUPEVNÉ

S vývojem leteckých motorů se už před první světovou válkou objevila i potřeba materiálů s lepšími mechanickými, korozivzdornými a creepovými vlastnostmi, které by zvyšující výkony leteckých motorů zvládaly lépe než do té doby používané Niklo – Chromové oceli. Nejdříve se začali používat niklové slitiny, které byly vytvrzovány wolframem. Ve třicátých letech Pierre Chevenard objevil princip precipitačního vytvrzování slitin Fe-Ni-Cr hliníkem a titanem, tím dal možnost ke vzniku dalším slitinám na bázi niklu. Již v počátku druhé světové války se tak ve Velké Británii zrodila první patentovaná slitina NIMONIC. Vývoj těchto materiálů jde dále rozdělit na dvě hlediska.^{[5],[6]}

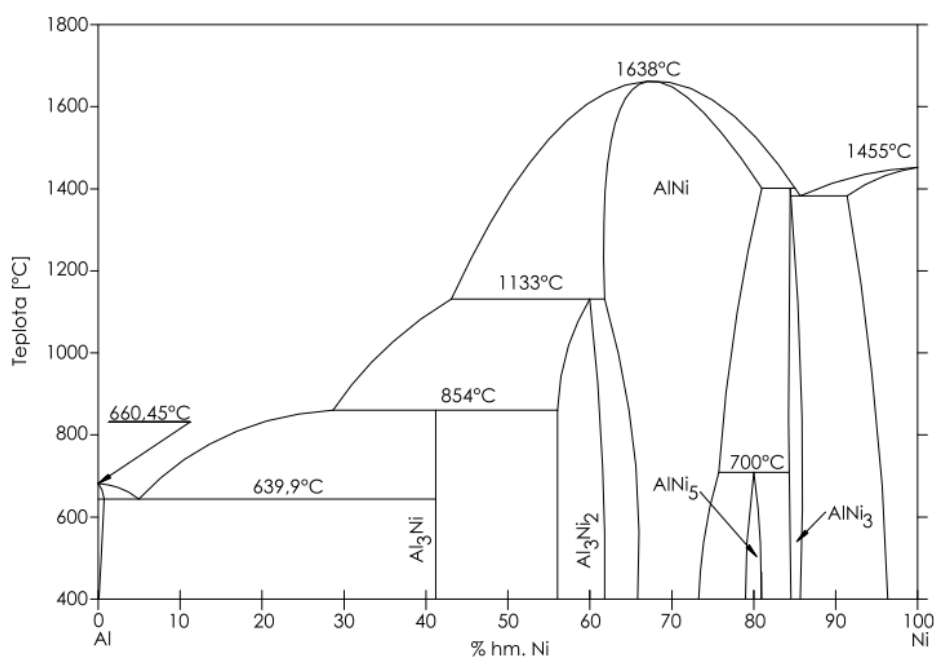
- Metalurgické – vakuové technologie, optimalizace chemického složení, snížení obsahu nežádoucích prvků (Pb, Bi, Te),
- Technologické – usměrněná krystalizace, izotermické a superplastické tváření, tepelné zpracování.

3.1 Charakteristika

Žárupevné a žáruvzdorné slitiny niklu, zvané též superslitiny, jsou materiály kombinující korozní odolnost a vysokou pevnost. Obvykle jsou určeny pro teplotně a napětově nejvíce namáhané součásti, u kterých už nelze použít ani korozně odolné martenzitické oceli třídy 17. Základem těchto materiálů je kubická mřížka plošně středěná (FCC) a tuhý roztok Ni-Cr případně Ni-Cr-Fe, obvykle se tento tuhý roztok označuje jako fáze γ . Vysoké pevnosti se dosahuje zpevněním matrice a to několika způsoby. U niklových slitin se používá především zpevňování precipitační intermetalickou fází, jejíž přítomnost má rozhodující vliv na žáropevnost slitin. Intermetalická fáze označovaná jako fáze γ' je v superslitinách tvořena hliníkem (Ni_3Al) a titanem (Ni_3Ti), kdy FCC mřížka obsahuje atomy niklu a uzlové body jsou obsazeny prvky Al (obr. 11) nebo Ti.^{[8],[6],[3]}

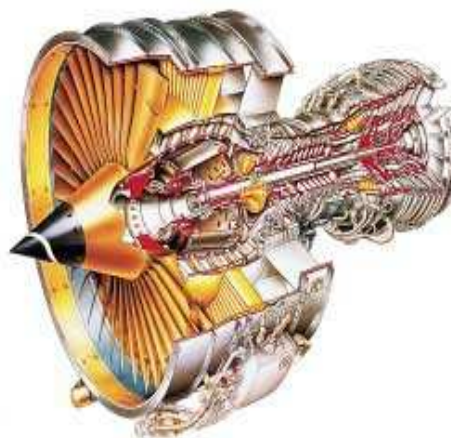


Obr. 11.: Struktura intermetalické fáze Ni_3Al ^[3]



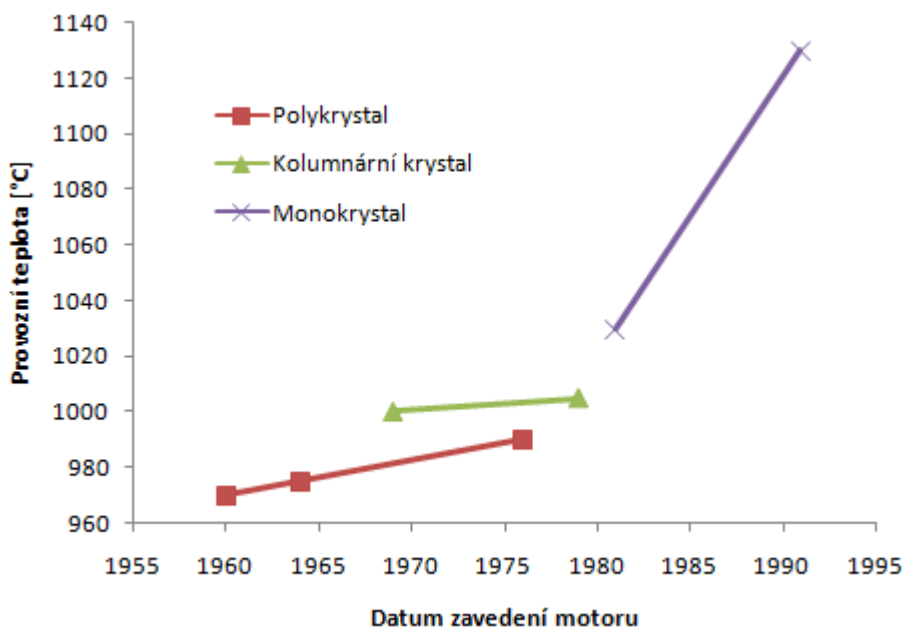
Obr. 12.: Binární rovnovážný diagram Al-Ni^[3]

Rozhodující je dále rovnoměrné rozložení fáze γ' ve struktuře materiálu a její obsah, kdy s rostoucím obsahem γ' stoupá žáropevnost. Z těchto důvodů je při výrobě snaha dosažení vysokých obsahů prvků Al a Ti ve slitinách. Problém nastává v případě zpracování materiálů, jelikož vysoké obsahy fáze γ' způsobují velký pokles tvárnosti a slitiny tak dostávají charakter kovokeramického materiálu. Zpracování tvářením se tím pádem vylučuje. Pokud je podíl fáze γ' větší než 45%, tak se interval mezi solidem a likvidem zužuje natolik, že je takřka nemožné materiál zpracovávat kovářím (**obr. 12**). Žárové materiály jsou tak z velké části omezeny na výrobu přesným litím nebo práškovou metalurgií. Žárovzdorné slitiny, u kterých je hlavním faktorem odolnost proti oxidaci za vysokých teplot a nikoli pevnost, mají menší obsahy intermetalických fází a jejich zpracovatelnost je možná tvářením za studena, se obvykle dodávají jako plechy apod. [5],[8],[6],[3].



Obr. 13.: Použití slitin Ni na turbínovém motoru (oranžově)^[8]

Niklové superslitiny nacházejí uplatnění v řadě oblastí, obvykle v chemickém průmyslu, automobilovém průmyslu, kosmonautice apod. Největší část ovšem tvoří plynové turbíny leteckých motorů a turbíny elektráren (**obr. 13**). Patrně nejvíce namáhanými částmi jsou lopatky oběžných kol, které jsou vystaveny vysokým teplotám, koroznímu prostředí a také mechanickému namáhání (odstředivé síly či vibrace při provozu). V soudobém provozu jsou lopatky v plynových turbínách vystaveny teplotám, které dosahují až 80% teploty tavení. Žárové slitiny mohou být používány dlouhodobě pro teploty dosahující maximálně asi 950°C (**obr. 14**). Slitiny bez mechanického namáhání (žárovzdorné) se používají až do teplot 1150°C. Tyto materiály jsou pro svou náročnou výrobu a použití některých prvků jako rhenium, titan apod. velice drahé, proto je jejich použití omezené. Pomyslnou hranici pro volbu niklových superslitin je teplota cca 600-650°C. Při nižších teplotách je ekonomicky výhodnější použití jiných konstrukčních slitin (většinou ocelí). [8],[6],[3]



Obr. 14.: Vývoj turbínových motorů^[6]

950°C (**obr. 14**). Slitiny bez mechanického namáhání (žárovzdorné) se používají až do teplot 1150°C. Tyto materiály jsou pro svou náročnou výrobu a použití některých prvků jako rhenium, titan apod. velice drahé, proto je jejich použití omezené. Pomyslnou hranici pro volbu niklových superslitin je teplota cca 600-650°C. Při nižších teplotách je ekonomicky výhodnější použití jiných konstrukčních slitin (většinou ocelí). [8],[6],[3]

V České Republice se ještě v 90. letech běžně používaly nejvíce slitiny z bývalého sovětského svazu, zřejmě proto, že s nimi byly dlouhých letů spolupráce se SSSR praktické a dobré zkušenosti.

Značeny jsou dle ruských norem GOST. Jako příklady jsou uvedeny:

- EI 435 – pro teploty maximálně 1000°C (žárovzdorná),
- EI 617 – pro teploty max. 800°C (žáropevná),
- ŽS-6K – pro teploty max 950°C (žáropevná).

Dále budou v práci uvedeny především slitiny výrobců z USA a Velké Británie. Existují ovšem i slitiny české výroby vyvinuté ve firmách Poldi Kladno, Škoda Plzeň nebo SVÚM Praha. Jedná se však o obdobu zahraničních slitin.^{[5],[8],[17]}

3.2 Chemické složení a mikrostruktura

Chemické složení superslitin je úzce spojeno s jejich vlastnostmi. Použitím jednotlivých chemických prvků, jejich různou koncentrací a kombinací se dosahují různé mechanické, korozní a creepové vlastnosti. K legování niklových slitin se používá mnoha prvků, mezi základní legury se mohou zařadit chrom, železo, hliník, titan. Méně používané jsou potom prvky jako niob, wolfram, tantal, molybden aj.,...^{[5],[6]}

3.2.1 Fáze γ

Základní fáze, označuje se také jako matrice. Prvky, které se rozpouští v matici s ní tvoří substituční roztok jejich hlavním úkolem je zpevňování fáze a zvýšení korozní odolnosti. Obvykle mají větší atomový poloměr a díky tomu vznikají v mřížce distorze, které vytváří překážky pro dislokace a tím se matrice zpevňuje. Vhodné je použití prvků jako kobalt, wolfram, molybden, chrom a železo. Jejich atomové rozměry jsou totiž větší než atomové rozměry niklu a to asi o 3-13%. Tyto prvky mají také vysokou atomovou hmotnost, což způsobuje značné problémy zvláště u turbínových motorů, které jsou určeny pro letecký průmysl, a jejich obsah se tím pádem omezuje. Jako nejvhodnější prvek na zpevnění matrice se jeví chrom, který má vyšší rozpustnost v matici než ostatní uvedené prvky kromě železa) a také nižší atomovou hmotnost a má tedy asi největší vliv na zpevnění fáze γ . Vysoká koncentrace chromu má také negativní dopady na matici. Spolu s vyššími obsahy wolframu a molybdenu mohou tvořit ve slitině tzv. TCP fáze (topologicky těsně uspořádané). TCP jsou fáze ve formě destiček, které materiálu dodávají dobrou creepovou odolnost a dobré korozní vlastnosti, ale zvyšují náchylnost slitiny ke křehkému lomu a to je například pro letecké motory takřka nepřijatelné. V **tab. 3** je uveden přehled prvků a jejich vliv v superslitinách^{[6],[3],[5]}

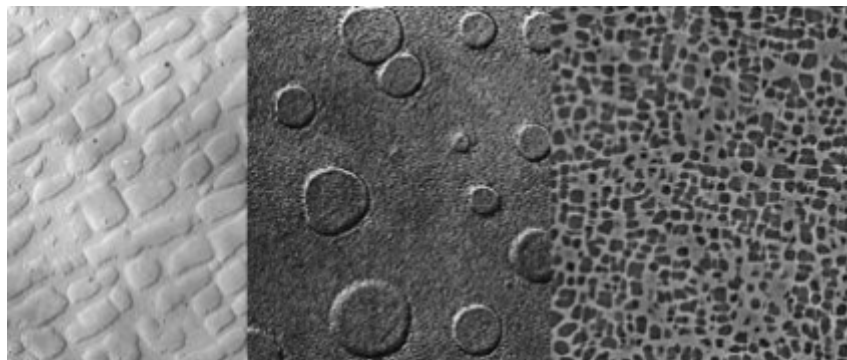
3.2.2 Fáze γ'

Jedná se o fázi s těsnou uspořádaností atomů ve všech krystalografických směrech. Je tvořena precipitáty Ni_3Al (**obr. 11**) a Ni_3Ti . Tato fáze slouží jako hlavní zpevňující fáze ve většině niklových superslitin. Fáze vzniká buď během výroby (chladnutí odlitků z vysokých teplot) nebo v důsledku tepelného zpracování, které se skládá z rozpouštěcího žhání, rychlého ochlazení a vytvrzování. Během tohoto procesu vzniká přesycený tuhý roztok γ a precipitace nastává při vytvrzení slitiny. Precipitáty krystalizují ve stejné krystalické mřížce jako fáze γ , tedy FCC. V některých slitinách se využívá vytvrzení niobem za vzniku Ni_3Nb tzv.: fáze γ'' . Při odlévání monokrystalických součástí se může titan v určitém intervalu nahradit tantalem. Je ovšem nutné dodržet intervaly Nb a Ta, protože jejich překročení může způsobit vznik intermetalických fází s jinou krystalickou mřížkou (fáze δ a η) a tyto fáze nemají zpevňující účinek. Důležitým faktorem je tzv. rozdíl mřížkových parametrů (misfit). Udává se jako rozdílnost mřížkových parametrů matrice a precipitátů.^{[5],[6],[3]}
Lze vypočítat ze vztahu:

$$\delta = \frac{\alpha_{\gamma'} - \alpha_{\gamma}}{\alpha_{\gamma}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Kde: $\alpha_{\gamma'}$ – mřížkový parametr precipitátů, α_{γ} – mřížkový parametr fáze γ .
 Misfit má velký vliv na konečný tvar precipitátů a to následovně (**obr. 15**):

- $\delta \leq 0,4 \%$ → kulovitý tvar precipitátů (**obr. 15** – uprostřed),
- $\delta \in (0,5 - 1)\%$ → kubický tvar precipitátů (**obr. 15** – vpravo),
- $\delta \geq 1,25 \%$ → tyčinkový tvar precipitátů (**obr. 15** – vlevo).



Obr. 15.: Tvar precipitátů ^[3]

3.2.3 Fáze γ''

Vyskytuje se ve slitinách niklu, kde je obsah Niobu větší jak 4 hm. % nebo obsah tantalu větší než 10 hm. %. Je to metastabilní fáze Ni_3Nb a Ni_3Ta s tetragonální prostorově středěnou mřížkou. Fáze většinou tvoří jemné destičkové precipitáty a její vliv je obdobný jako u fáze γ' . Pokud se ve slitině nachází fáze γ'' , potom se v materiálu vždy nachází i fáze γ' , ale jako hlavní zpevňující fáze se u takových slitin využívá γ'' . Tato fáze je ovšem stabilní jen do teploty 650°C . Po překročení této teploty se její mřížka mění na ortorombickou a precipitáty se stávají velkými a deskovitými, přičemž negativně ovlivňují vlastnosti slitiny. Takto zpevněné superslitiny mají znatelně nižší provozní teploty. To můžeme pozorovat např. u slitin IN-706 a IN-718. ^{[5],[6],[3]}

3.2.4 Karbidy v superslitinách

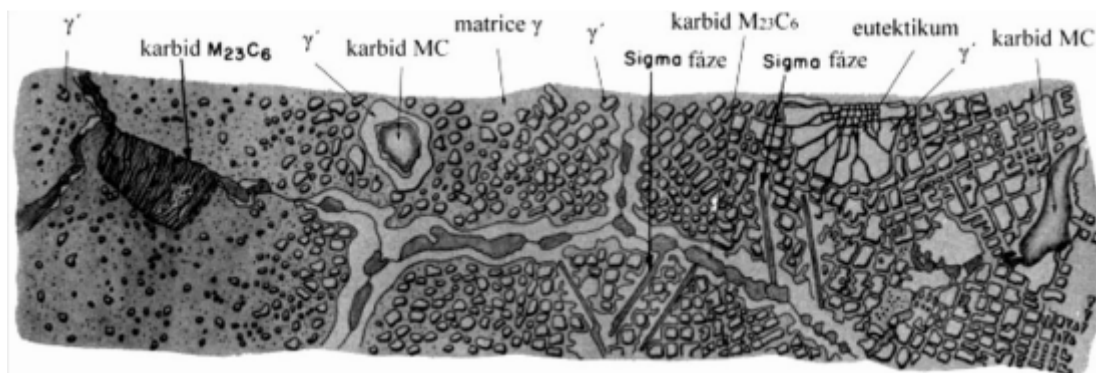
Jsou zastoupeny hlavně v polykrystalických litých a kovaných slitinách. Uhlík, který je zde zastoupen obvykle v množství 0,2-0,3 % reaguje s ostatními prvky jako wolfram, molybden, tantal, hafnium, niob a titan, tvoří primární karbidy MC. Karbidy se vyskytují v mezidendritických prostorech matrice a jsou umístěny jak na hranicích zrn tak i uvnitř zrn. Karbidy plní ve slitinách několik podstatných rolí. Pokud jsou vhodně vyloučené, a to na hranicích zrn, potom zpevňují tyto hranice a mohou zlepšovat creepovou odolnost materiálu. Dojde-li k precipitaci karbidů, dojde také ke zpevnění matrice a v neposlední řadě vážou prvky, které by mohli způsobovat fázovou nestabilitu během provozu. Při tepelném zpracování nebo následném provozu se primární karbidy mění na sekundární. V matrici se mohou vyskytovat sekundární karbidy typu M_{23}C_6 , M_6C nebo M_7C_3 a tyto karbidy jsou vhodnější pro strukturu materiálu, protože primární karbidy jsou hrubé a velké a mohou iniciovat vznit trhlin a proto mohou být nežádoucí. ^{[5],[6],[3]}

Tab. 3.: Vliv prvků v superslitinách^[6]

Prvek	Zpevnění matrice	Vliv na objemový podíl fáze γ'	Hranice zrn	Ostatní vlivy
Cr	Mírné	Mírný	$M_{23}C_6$ a M_7C_3	Zlepšuje korozní odolnost, podporuje vznik TCP fází
Mo	Vysoké	Mírný	M_6C a MC	Zvyšují hustotu a podporují vznik TCP fází
W	Vysoké	Mírný		
Ta	Vysoké	Velký		
Nb	Vysoké	Velký	NbC	Podporuje vznik γ' a δ
Ti	Mírné	Velmi vysoký	TiC	
Al	Mírné	Velmi vysoký		Zlepšuje korozní odolnost
Fe		$\gamma' \Rightarrow \delta, \eta, \gamma''$		Snižuje korozní odolnost a podporuje vznik TCP fází
Co	Nepatrné	V některých slitinách mírné		Zvyšuje teplotu solidu
Re	Mírné			Zvětšuje misfit, zpomaluje hrubnutí γ'
C	Mírné		Karbidy	
B,Zr	Mírné			Zpomalují hrubnutí karbidů, zlepšují pevnost hranic zrn, zlepšují creepovou pevnost a houževnatost

3.2.5 Mikrostruktura superslitin

Superslitiny se legují mnoha prvky. Jejich přítomnost a množství rozhodují o výskytu možných fází v mikrostruktuře. Dalšími podstatnými faktory, které ovlivňují složení mikrostruktury, jsou technologie výroby a tepelné zpracování. Typy fází a jejich obsah ve struktuře určují výsledné vlastnosti slitiny. Při dlouhodobém provozu za vysokých teplot může docházet k degradaci slitiny, díky faktu, že postupně dochází k hrubnutí zrna, a vzniku TCP fází, proto je vhodné věnovat této problematice důslednou pozornost. ^{[6],[3],[5]}



Obr. 16.: Vývoj superslitin a jejich fází^[3]

3.3 Slitiny NIMONIC

První slitina (NIMONIC 75) tohoto druhu byla vyrobena ve Velké Británii v roce 1940. Slitina byla použita pro lopatky prototypu proudového motoru sira Franka Whittlea. NIMONIC jsou superslitiny na bázi niklu a chromu nebo niklu, chromu a kobaltu, kde zastoupení chromu je asi 14-23%. Kobalt může být v těchto slitinách zastoupen od 0 až do přibližně 22%. Dalšími legujícími prvky mohou být hliník, titan, uhlík, cer, molybden a železo v různém množství (obvykle v procentech viz **tab. 7**). Slitiny Nimonic jsou používány pro svoji dobrou odolnost proti oxidaci a pevnost za vysokých teplot. Těchto slitin je větší množství a dále budou popsány jen některé hlavní komerčně využívané materiály, jako jsou NIMONIC 75, NIMONIC 80A, NIMONIC 86 a NIMONIC PE16.^{[14],[10],[24]}

3.3.1 NIMONIC 75

Slitina, jejíž základní strukturu tvoří nikl a chrom, dalšími legujícími prvky jsou uhlík a titan. Jak je již popsáno výše, je to první vyvinutá slitina tohoto druhu. Slitina je tvořena stabilním tuhým roztokem s austenitickou strukturou, která dále může obsahovat 3 fáze a to:

- Mezikrystalické karbidy, nitridy nebo karbonitridy typu $M(CN)$, kde M je obvykle titan. Viditelné jsou na leštěném vzorku jako takřka rovnoosé, kulovité nebo krychlové vměstky. Jejich barva se může podstatně měnit (při pozorování na světelném mikroskopu). Karbidy jsou bílé až fialové, nitridy bílé až žluté,
- U hranic zrn, které jsou bohaté na chrom, se vyskytují karbidy typu $M_{23}C_6$. Tyto karbidy lze rozpustit v matici tepelným zpracováním,
- Vměstky kyslíku nebo síry, které se objevují po dezoxidaci tekutého kovu. Jsou viditelné na leštěném vzorku jako malé tmavé částice, často orientované ve směru zpracování materiálu. Obsah těchto vměstků ve slitině lze minimalizovat použitím vakuové metalurgie.

NIMONIC 75 má dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot (srovnání viz **tab. 4 a 5**). Pevnostní vlastnosti za vysokých teplot se podstatně snižují, jak ukazuje **tab. 6**. Slitina se může zpracovávat jak odléváním, tak tvářením za tepla a to v rozmezí 950-1200 °C. Pro tvářením za studena není slitina nijak omezena, je lehce tvárná, snad jen potřeba přihlídnout k faktu, že dochází k rychlému zpevňování materiálu. Dá se také dobře svařovat buď ruční obalovanou elektrodou, metodou TIG, MIG a pod tavidlem. Před svařováním je však nevhodné deformační zpevnění a materiál, který se tvářel za studena, se před svařováním obvykle žíhá. NIMONIC 75 je žáruvzdorná slitina, která i dnes nachází uplatnění pro turbínové motory, ale hlavně pro komponenty strojů pro tepelné zpracování a pro části pecí.^{[14],[10]}

Tabulka 4.: Odolnost proti oxidaci (průběžný ohřev)^[14]

Slitina	Ztráta hmotnosti (mg/cm^2) po 100 hodinách při				
	800°C	900°C	950°C	1000°C	1100°C
NIMONIC 75	0.55	1.18	4.00	6.66	8.92
NIMONIC 80A	0.64	2.62	3.96	5.96	11.20
NIMONIC 90	0.46	2.52	5.50	10.40	11.23
NIMONIC 105	0.11	0.49	0.99	1.43	6.49

Tabulka 5.: Odolnost proti oxidaci (přerušovaný ohřev)^[14]

Slitina	Ztráta hmotnosti (mg/cm^2) po 100 hodinách při			
	900°C	950°C	1000°C	1100°C
NIMONIC 75	2.25	4.61	4.68	14.1
NIMONIC 80A	2.75	8.92	9.06	20.2
NIMONIC 90	3.02	8.12	8.18	17.7
NIMONIC 105	1.19	1.54	-	13.3

3.3.2 NIMONIC 80A

Slitina podobná výše popsané, avšak NIMONIC 80A obsahuje více titanu (1,8-2,7%) a také hliník (1,0-1,8%). Díky této skutečnosti je slitina precipitačně vytvrditelná, tento fakt spolu s dobrou pevností (**obr. 17**), korozní odolností, creepovými vlastnostmi a odolností proti oxidaci za vysokých teplot umožňuje použití materiálu až do teplot cca 815°C.^{[14],[10],[24]}

Materiál se zpracovává obvykle odléváním a to na vzduchu. Vakuová metalurgie lze také s výhodou použít. Pro materiály dále kované se využívá elektrostruskové přetavování.

Teploty pro tváření za tepla jsou doporučeny kolem 1050 – 1200 °C. Zpracování

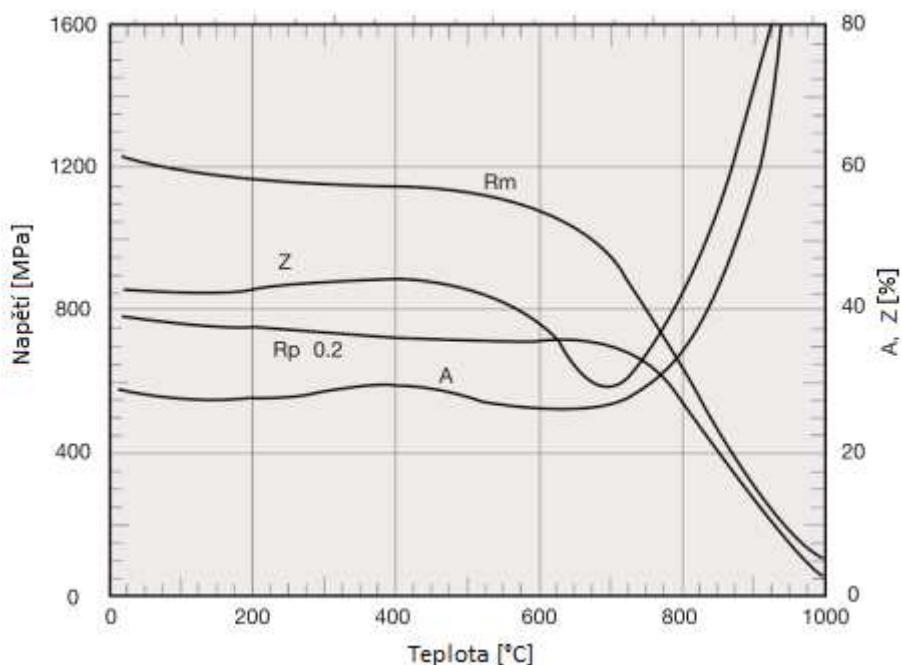
tvářením za studena není problémem.

Pro obrábění materiálu se využívají klasické metody jako pro

obrábění ocelí, při procesu ovšem dochází ke zpevnění povrchu součásti což může činit problémy, vzhledem k tomu, že maximální tvrdost materiálu se pohybuje mezi 250 až 350 HV. Svařitelnost materiálu je dobrá, dají se použít klasické metody svařování, podmínkou je vhodný přídatný materiál. Pro dosažení dobrých mechanických vlastností je nutno po svařování zařadit tepelné zpracování. Slitina se obvykle žíhá na cca 1080 °C po dobu 8 hodin s následným ochlazením na vzduchu. Běžně je materiál využíván na části plynových turbín, trubky nukleárních reaktorů, výfukové ventily (**obr. 18**) spalovacích motorů, apod...^{[14],[10],[24]}

3.3.3 NIMONIC 86

Tento materiál má dobrou zpracovatelnost, kujnost a svařitelnost, kombinovanou s vyšší pevností při tečení (**tab. 6**) a velmi dobrou odolností proti cyklické oxidaci do teplot až 1050°C. Těchto vlastností se kromě klasické základní niklo-chromové matrice dosahuje legováním molybdenem v obsahu 10% a v malém množství taky cerem (0,03%), který je vzácný a drahý. Slitina se snadno a dobře zpracovává tvářením za tepla a za studena všemi možnými způsoby. Jak už bylo řečeno, svařitelnost je velice dobrá, zvláště při použití metody TIG a trubičkového drátu s odpovídajícím složením vykazuje svar vlastnosti velice podobné základní matici. Materiál se úspěšně používá pro části pecí a strojů pro tepelné zpracování, dále na komory plynových turbín, aj...^{[14],[10]}



Obr. 17.: Graf mechanických vlastností protlačovaného profilu ze slitiny NIMONIC 80A v závislosti na teplotě^[14]



Obr. 18.: Výfukové ventily ze slitiny NIMONIC 80A^[8]

3.3.4 NIMONIC PE16

Komplexně legovaná slitina na bázi Ni-Cr-Fe, kde obsah niklu klesá pod 50% (běžně se uvádí Ni+Co = 42-45%, kdy Co = max. 2%). Je to levnější prvek, jelikož dražší prvky jsou nahrazeny železem, kterého se v materiálu vyskytuje běžně cca 31%. Matrice je zpevněna přísadkou molybdenem (2,-3,8%), dále slitina obsahuje hliník a titan (oba prvky v rozmezí 1,1-1,3%) a je tedy možno materiál precipitačně zpevňovat. Slitina byla vyvinuta jako žárovečná pro pracovní teploty 500-750 °C. Materiál se dále vyznačuje výbornou tvárností, a svařitelností, dá se tvářet za tepla (doporučené teploty 968-1176 °C [14]) a za studena všemi konvenčními způsoby, ovšem slitina vykazuje vyšší mechanické charakteristiky než obvykle tvářené oceli a je nutno použití větších pracovních tlaků, které se dají snížit použitím mazadel. Pro tvářením za studena se nedoporučuje používat nástrojové oceli uhlíkové, protože mohou způsobovat zadíraní. Co se týče obrábění, je slitina obdobná jako NIMONIC 80A. U všech obráběcích operací se používají procesní kapaliny kapaliny. Tepelné zpracování u slitiny se dá provádět dvěma způsoby a to:

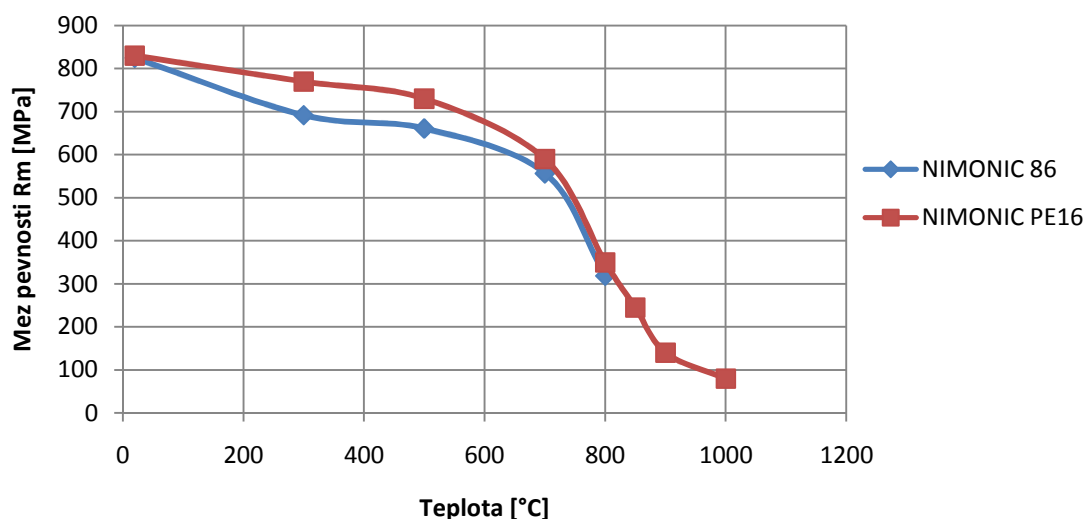
- Teplota 1040°C po dobu 4hod. + Teplota 900°C po dobu 1hod. + teplota 750°C po dobu 8hod.,
- Teplota 1040°C po dobu 2hod. + Teplota 800°C po dobu 2hod. + teplota 700°C po dobu 16hod.

Pozn.: Pro obě tepelné zpracování se doporučuje ohřev střídavým el. proudem.

Tato slitina se využívá například na části plynových turbín, nukleárních reaktorů, průmyslových pecí, hlavně v případech kdy jsou hlavními požadavky pevnost a vysoká pracovní teplota.^{[14],[10],[24]}

Tabulka 6.: Mechanické vlastnosti výše popsaných slitin (při tep. 20°C)^[24]

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu v tahu [MPa]	Prodloužení v tahu [%]
NIMONIC 75	750	275	42
NIMONIC 80A	1250	780	30
NIMONIC 86	825	410	42
NIMONIC PE16	900	450	28



Obr. 19.: Graf porovnání pevnosti v závislosti na teplotě slitin NIMONIC 86 a PE16

Tabulka 7: Chemické složení popsaných slitin značky NIMONIC^[10]

Slitina	Prvek [%]									
	C	Cr	Fe	Mn	Mo	Ti	Al	Co	Si	Ni
Nimonic 75	0,08-0,15	18,0-21,0	max. 5	max. 1,0	-	0,2-0,6	-	-	max. 1,0	Základ
Nimonic 80A	max. 0,10	18,0-21,0	max. 3	max. 1,0	-	1,8-2,7	1,0-1,8	max. 2	max. 1,0	Základ
Nimonic 86	0,05	25,0	-	-	10,0	-	-	-	-	Základ
Nimonic PE16	0,04-0,08	15,5-17,5	zákl.	max. 0,2	2,8-3,8	1,1-1,3	1,1-1,3	max. 2	max. 0,5	42-45 (Ni+Co)

Protože se slitin NIMONIC vyrábí více druhů a pro obsah této práce by byl jejich popis příliš rozsáhlý, je popis dalších materiálů této značky omezen pouze na následující tabulku.

Tabulka 8: Popis dalších slitin značky NIMONIC^[8]

Slitina	Chemické složení [%]	Charakteristika
NIMONIC 90	Cr – 19,5; Co – 16,5; Ti – 2,5; Al – 1,5; C – max. 0,13; Ni – zbytek	Slitina s odolností proti tečení do 620°C, použití – lopatky, disky turbín
NIMONIC 105	Co – 20; Cr – 15; Mo – 5; Al – 4,5; Ti – 1,2; C – max. 0,12; Ni – zbytek	Dobrá odolnost proti tečení do 950°C, použití – lopatky a disky turbín
NIMONIC 115	Cr – 15; Co – 14,5; Mo – 4; Ti – 4; Al – 5; C – max. 0,15; Ni – zbytek	Zvýšený obsah Ti a Al => větší precipitační zpevnění, pevnost v tečení do 1010°C, použití – turbínové lopatky leteckých motorů
NIMONIC 263	Cr – 20; Mo – 6; Co – 20; Al – 0,5; Ti – 2,2; C – max. 0,06; Ni – zbytek	Dobrá tvařitelnost za vysokých teplot, dobře svařitelná, vhodná pro výrobky z plechu

Pozn.: Všechny slitiny uvedené v tabulce jsou vytvrditelné

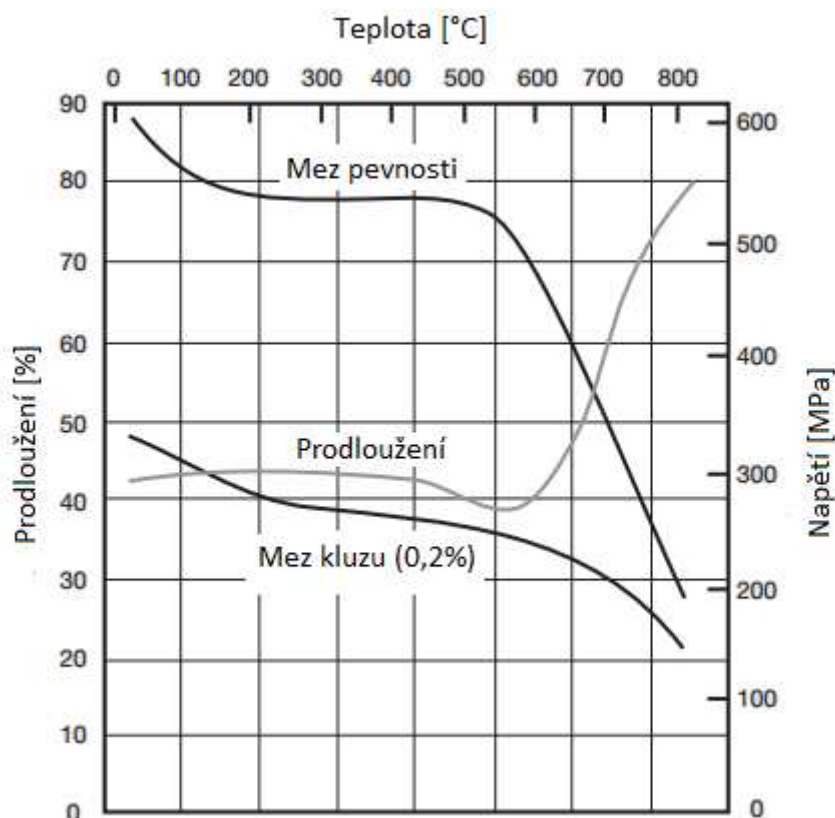
3.4 Slitiny INCOLOY

Jsou materiály, jejichž základní matici tvoří ternární tuhý roztok niklu, chromu a železa. Obsahy těchto základních prvků ve slitinách se velice liší. Pokud se podíváme na obsah niklu, můžeme pozorovat, že se jedná jak prvek majoritní (př. INCOLOY 945) tak i o prvek minoritní (př. INCOLOY A-286), celkový interval obsahu niklu ve slitinách INCOLOY potom může být cca 24-55%. Ještě větší interval však lze pozorovat u obsahu železa, který může dosahovat minimálních hodnot kolem 9% a při maximálních hodnotách dokonce v některých slitinách překračuje obsah niklu a jeho obsah se pohybuje na hranici 52%. U chromu je naopak rozsah poměrně užší a to asi 13-25%. Co se týče ostatních prvků, jsou tyto slitiny legovány docela rozmanitě (**tab. 12**). První vyvinuté a dodnes používané materiály jsou většinou legovány jen malým množstvím titanu a hliníku. Novější slitiny jsou legovány navíc prvky jako vanad, měď, molybden, mangan či niob. V některých je použit i malý obsah křemíku. Materiály značky INCOLOY jsou ceněny pro svoji výbornou odolnost proti oxidaci a různým chemikáliím za vysokých teplot, dobrou zpracovatelnost a v neposlední řadě pro svoji pevnost a odolnost proti tečení.^{[10],[14],[18],[20]}

3.4.1 INCOLOY 800, 800H, 800HT

První slitina tohoto druhu INCOLOY 800, byla uvedena do prodeje v roce 1950 jako reakce na potřebu materiálu, který je žáruvzdorný a odolný proti korozi za vysokých teplot. Podmínkou ovšem bylo, aby materiál obsahoval méně niklu, protože dodnes je nikl velice drahý kov. Nikl je zde nahrazen velkým obsahem železa a to minimálně 39,5%. Mimo jiné, je to první slitina, kde byly vědomě použity malé obsahy Al a Ti (0,15-0,60%) k vytvrzení materiálu. Obsah uhlíku v tomto materiálu je regulován minimálně pod 0,1%, většinou jsou obsahy C ale mnohem menší. Na tento fakt navazuje **INCOLOY 800H**. Bylo totiž zjištěno, že materiál obsahující kolem 0,1% C má lepší creepové vlastnosti (nad 600°C) a větší odolnost proti vzniku trhlin. Proto se u slitiny 800H upravil obsah uhlíku na rozmezí 0,05 až 0,1% a zároveň se stanovila minimální velikost zrna dle ASTM (5 nebo hrubší). **INCOLOY 800HT** opět nedochází k velkým změnám jak v chemickém složení, tak ve vlastnostech slitiny. Rozdíl se týká pouze upravení obsahu uhlíku na 0,6 až 0,1% a obsahu titanu a hliníku, kdy platí, že $Al+Ti=0,8-1,20\%$. Dá se tvrdit, že chemické složení 800HT bude vždy v rozmezí 800H, ale tohle pravidlo neplatí obráceně. Slitina kombinuje vlastnosti obou uvedených materiálů. Krom výše popsaných rozdílů mají slitiny z velké části stejné vlastnosti a výhody, jsou to:^{[10],[14],[18],[20]}

- Dlouhodobá odolnost proti vysokým teplotám,
- Vynikající odolnost proti oxidaci, nauhličení a sirtatému prostředí,
- Snadno obrobitelné konvenčními metodami,
- Dobrá odolnost proti korozi ve vodě při zvýšených teplotách,
- Výborná svařitelnost.



Obr. 20.: Graf mechanických vlastností slitiny INCOLOY 800 v závislosti na teplotě (pro tyč válcovanou za tepla)^[14]

3.4.2 INCOLOY 20

Žárovzdorná slitina legovaná molybdenem a mědí v rozmezí 3-4%. Dále může obsahovat malý obsah manganu do 2%, křemíku a niobu do 1% (běžně se uvádí $Nb + Ta < 1\%$). Vzhledem k tomu, že obsah niklu je ve slitině nižší než obsah železa (Fe 31-45%, Ni 31-34%), dá se zvážit fakt, zda se jedná o slitinu na bázi niklu, nebo o vysoce legovanou korozivzdornou ocel. Kromě toho se slitina vyznačuje vynikající korozní odolností v chemických prostředích, ve kterých se vyskytuje kyselina sírová (**tab. 10**). Dá se úspěšně použít i v jiných prostředích zahrnujících chloridy, kyselinu dusičnou, fosforečnou a vodu. Velkou výhodou slitiny je odolnost proti šterbinové korozi, která se zvyšuje přidáním molybdenu. INCOLOY 20 se dá tvářet všemi klasickými konvenčními metodami jak za tepla (760-1175°C), tak za studena. Svařitelnost a obrobiteľnosť je dobrá. Co se týče tepelného zpracování, obvykle se používá slitina v žíhaném stavu (982-1010°C), čas se určuje dle velikosti dílu, ohřev střídavým proudem). Materiál se používá k výrobě směšovací nádrží, výměníků tepla, čerpadel, ventilů, spojovacích dílů sloužících k produkci benzínu, výbušnin, léků, a jiných chemikálií a syntetických materiálů...^{[10],[14],[18],[20]}

Tabulka 10: Korozní odolnost slitiny INCOLOY 20 v závislosti na teplotě a koncentraci kyseliny sírové.^[14]

Teplota [°C]	Koncentrace H ₂ SO ₄ [%]	Korozní rychlost „a“ [mm]
50	70	0,051
60	20	0
60	70	0,076
60	90	0,102
75	70	0,127
85	20	0,457
85	70	0,178
85	90	0,381
95	90	0,686
100	20	0,432

3.4.3 INCOLOY 945,925,945X

Superslitina legovaná mědí (1,5-3%), molybdenem (3-4%) dále niobem (2,5-4,5%) titanem (0,5-2,5%) a hliníkem (0,01-0,7%). Díky legurám Nb, Ti a Al je slitina vytvrditelná, odolná proti napětově-koroznímu praskání a má vysokou pevnost. V materiálu se vyskytuje fáze γ' i γ'' . Slitina má velice dobré korozní vlastnosti. Mo a Cu dodává korozní odolnost v redukčním prostředí, Cr v prostředí oxidačním a použitelný je i v mořské vodě. Materiál vykazuje velmi dobrou korozní odolnost a odolnost proti vzniku trhlin v kyselém prostředí, zejména pak v prostředí obsahujícím sirovodík. Zpracování slitiny tvářením je obdobné jako u výše popsaných materiálů. Při svařování se dosahuje nejlepších výsledků za použití obloukového svařování v ochrané atmosféře plněným drátem s pulsním přenosem. Nedoporučuje se materiál svařovat pod tavidlem a ruční obalovanou elektrodou. Velkou výhodou slitiny je dobrá obrobiteľnosť, zvlášť za použití velmi tuhých nástrojů s pozitivním úhlem čela. Vyšších pevností materiálu se dosahuje vhodným tepelným zpracováním, běžný postup je žíhání (1010-1066°C) po dobu 0,5-4 hodiny, ochlazení ve vodě a následné vytvrzení (704-732°C) po 6-8 hodin s ochlazením v peci (26-56°C/hod.). INCOLOY 945 je ceněný zvláště v petrochemickém průmyslu, kde je zapotřebí materiálů s vysokou pevností a odolností proti korozi v agresivních prostředích. Běžně se používá na ventily, trubky pro vedení plynů z nalezišť hluboko v zemi a v moři, čerpadla, potrubní systémy s vysokou pevností. Obdobnou slitinou je **INCOLOY 925**. Ta neobsahuje legující prvek Nb, to má za následek nepřítomnost fáze γ'' , a tím pádem je nižší i zpevnění slitiny. Na druhou stranu je

orientována slitina INCOLOY 945X, která obsahuje větší množství niobu (2,5-4,5%) než INCOLOY 945 a proto po tepelném zpracování dosahuje větších pevností (**tab. 11**). Ostatní výše popsané charakteristiky jsou srovnatelné pro všechny slitiny snad jen z výjimkou uvedených teplot a délky tepelného zpracování.^{[10],[14],[18],[20]}

Tabulka 11.: Porovnání mechanických vlastností uvedených slitin^[10]

Slitina	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]	Tvrdost [HRC]
INCOLOY 925	759	965	18	26
INCOLOY 945	862	1034	18	32
INCOLOY 945X	965	1138	18	32

Tabulka 12: Chemické složení popisovaných slitin značky INCOLOY^{[10],[18]}

Slitina	Prvek [%]									
	C	Cr	Fe	Al	Ti	Cu	Mo	Nb	Mn	Ni
INCOLOY 800	max. 0,100	19,0-23,0	min. 39,5	0,15-0,60	0,15-0,60	-	-	-	-	30-35
INCOLOY 800HT	max. 0,060-0,010	19,0-23,0	39,5	0,25-0,60	0,25-0,60	-	-	-	-	30-35
INCOLOY 20	max. 0,070	19,0-21,0	základ	-	-	3,0-4,0	2,0-3,0	1,0 Nb+Ta	max. 2	32-38
INCOLOY 945	max. 0,005-0,040	19,5-23,0	základ	0,01-0,70	0,50-2,50	1,5-3,0	3,0-4,0	2,5-4,5	max. 1	45-55
INCOLOY 925	max. 0,030	19,5-22,5	min. 22,0	0,10-0,50	1,90-2,40	1,5-3,0	2,5-3,5	max. 0,5	max. 1	42-46

3.5 Slitiny HASTELLOY

Materiály charakteristické velice rozdílným chemickým složením. Základní matrice tak není pouze na bázi Ni-Cr či Ni-Cr-Fe, ale může též mít složení Ni-Cr-Co nebo Ni-Mo. Obsah prvků, jež tvoří základní matici se pohybuje ve velkých intervalech (Cr ~ 1,5-33%, Fe ~ 0-20%, Co ~ 0,5-20%, Mo ~ 4-28,5%). V závislosti na koncentraci základních prvků v daném materiálu mají slitiny HASTELLOY velice rozdílné vlastnosti ať už se jedná o mechanické, korozní, únavové či teplotní charakteristiky (chemické složení jednotlivých jakostí uvedeno v **tab. 13**). Dále mohou být slitiny legovány wolframem, nebo prvky Al a Ti, které umožňují vytvrzení. Materiály této značky se využívají především jako korozivzdorné slitiny navržené pro práci ve výrazně oxidačním nebo redukčním prostředí. Některé jsou ovšem navrženy pro použití za vysokých teplot jako součásti plynových turbín či průmyslových pecí apod...^{[18],[16],[12]}

Tabulka 13: Chemické složení popsaných slitiny značky HASTELLOY.^[18]

Slitina	Prvek [%]								
	C	Cr	Mo	W	Fe	Co	Ti	Al	Ni
HASTELLOY C-22	max. 0,015	20,0-22,5	12,50-14,50	2,5-3,5	2-6	Max. 2,5	-	-	základ
HASTELLOY C-276	max. 0,010	14,5-16,5	15,00-17,00	3-4,5	4-7	Max. 2,5	-	-	57
HASTELLOY C-263	max. 0,060	20,0	Max. 5,85	-	-	20,0	Max. 2,15	Max. 0,45	51
HASTELLOY X	0,050-0,150	20,5-23,0	8,00-10,00	0,2-1,0	17-20	0,5-2,5	-	-	základ

3.5.1 HASTELLOY C – 22

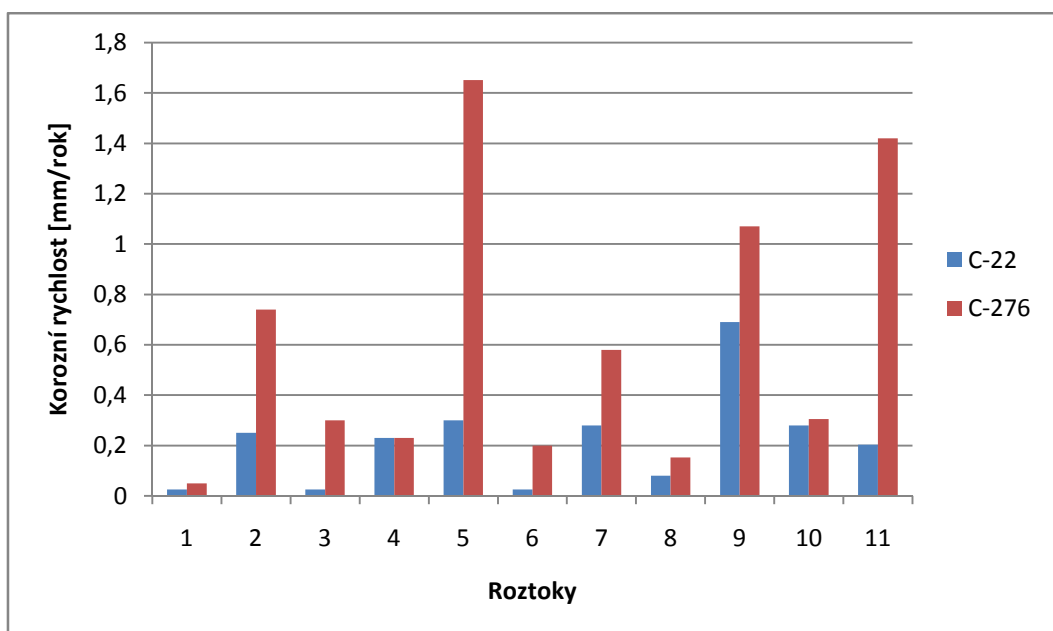
Slitina na bázi Ni-Cr s obsahem chromu ~ 22%. Dalšími legujícími prvky jsou molybden (Mo~13%), wolfram (Wo ~ 3%), železo (Fe = 2-6%) a kobalt (Co max. 2,5%). Materiál se vyznačuje vynikající odolností proti korozi, zvláště proti šterbinové korozi a napětově koroznímu praskání zvláště ve vodních prostředích a v roztocích, které obsahují kyselinu dusičnou nebo chloridy (**obr. 21**). Dobré vlastnosti vykazuje také v redukčních či oxidačních atmosférách obsahujících páru. Dále má výbornou korozní odolnost v širokém rozsahu organických i anorganických látek jako jsou chlorid měďnatý (železitý), kyselina mravenčí, kyselina octová, mořská voda a solné roztoky (**tab. 14**). Materiál se dá výborně tvářet jak za tepla, tak i za studena (vliv zpevnění při tváření za studena viz **tab. 15**). Preferovanější je metoda tváření za studena, protože slitina má velice dobrou tažnost, ovšem je také houževnatější než austenitické korozivzdorné oceli a tudíž je potřeba větších tvářecích sil. Slitina se používá většinou jako tepelně zpracovaná. TZ se skládá s ohřevu na teplotu 1121 °C a následné rychlé ochlazení na vzduchu nebo ve vodě. Slitina C-22 je velice dobře svařitelná metodami MIG, MAG a TIG, navíc velice dobře odolává tvorbě precipitátů na hranicích zrn v tepelně ovlivněné oblasti a tak je materiál velice dobře použitelný proti chemikáliím i ve svařeném stavu. Vhodné je při svařování použití plněného drátu. Naopak, nevhodné je použití svařování pod tavidlem, protože tento způsob svařování dodává do materiálu velké množství tepla a tím je zpomalen proces ochlazování. Možnost obrábění materiálu je obdobné jako u ostatních superslitin. Materiál se dá obrábět konvenčními metodami s ohledem na vysoké zpevňování povrchu a uvolňování velkého množství tepla v místě řezu. Díky všem výše popsaným vlastnostem se slitina C-22 využívá ve velké škále odvětví, jako jsou například chemické zpracování, výroba celulózy a papíru, těžba ropy a zemního plynu (i na moři), spalovny odpadu, produkce pesticidů apod...^{[12],[16],[18]}

Tabulka 14: Porovnání korozních odolností slitin C-22 a C-276^[16]

Médium	Koncentrace [%]	Teplota [°C]	Průměrná rychlost koroze [mm/rok]	
			HASTELLOY C-22	HASTELLOY C-276
Kyselina octová	99	100	0	<0,025
Chlorid železitý	10	100	0,025	0,051
Kyselina mravenčí	88	100	<0,025	0,254
Kyselina chlorovodíková	1	100	0,076	0,330
	1,5	100	0,356	0,813
	2	90	0	0,025
	2	100	1,549	1,295
	2,5	90	<0,025	0,305
	2,5	100	3,581	2,159
	10	100	10,16	7,315

3.5.2 HASTELLOY C-276

Slitina s podobným chemickým složením jako C-22. Má ale nižší obsah chromu (cca 15%) a vyšší obsah molybdenu (cca 16%). Protože je složení materiálu velice podobné výše popsanému C-22, většina vlastností ať korozivzdorných, technologických, nebo mechanických je více méně obdobná. Obecně vzato lze tvrdit, že C-276 má oproti C-22 horší korozivzdorné vlastnosti (zvláště proti šterbinové korozi – viz **obr. 21** a **tab. 14**). Rozdílné hodnoty můžeme pozorovat u tažnosti materiálu, ta může dosahovat až ~70%. Za zmínku stojí houževnatost slitiny, která je vysoká i za kryogenních teplot (KCU = 357 J, pro T = 196°C). Materiál se nedoporučuje svařovat plamenem. Použití stejné jako u C-22.^{[12],[16],[18]}



Obr. 21.: Porovnání korozních rychlostí slitin C-22 a C-276 pro různé druhy roztoků kde^[16]:
 1 – 10% FeCl₃, 2 – 1,5% HCl, 3 – 2,5% HCl, 4 – 2% HF, 5 – 5% HNO₃ + 25% H₂SO₄ + 4% NaCl, 6 – 5% HNO₃ + 1% HCl, 7 – 10% H₂SO₄, 8 – 50% H₂SO₄, 9 – 5% H₂SO₄ + 0,1% HCl, 10 – 25% H₂SO₄ + 200 ppm Cl⁻, 11 – 23% H₂SO₄ + 1,2% HCl + 1% FeCl₃ + 1% CuCl₂

Tabulka 15: Vliv deformace materiálu při tváření za studena na zpevnění^[16]

Deformace [%]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
0	427	800	73
10	758	972	42
20	972	1137	28
40	1330	1420	15
60	1682	1723	6

3.5.3 HASTELLOY X

Materiál se základní matricí Ni-Cr-Fe, kde obsahy prvků Cr (~22%) a Fe (~18%). Jediný další legující prvek je molybden s obsahem cca 9%. Tato kombinace zaručuje slitině výbornou odolnost proti oxidaci a pevnost za vysokých teplot. Obecně je slitina korozně odolná v redukčních atmosférách, a také proti nauhličování a nitridování. Bylo zjištěno, že materiál vykazuje též výbornou odolnost proti napětíově koroznímu praskání při použití v petrochemickém průmyslu, hlavně jsou-li v atmosférách obsaženy inoty vodíku. Odolnost proti oxidaci se udává do teplot až 1200°C, pevnostní vlastnosti za vysokých teplot jsou uvedeny v **tab. 16**. Slitina si udržuje dobrou tažnost i po dlouhých pracovních intervalech za vysokých teplot ($A = 23\%$, 760°C/1000h). Dále má materiál výbornou tvařitelnost a svařitelnost. Dobrá tažnost umožňuje dobrou tvařitelnost za studena. Svařování se doporučuje ruční obalovanou elektrodou, metodou MIG, TIG a také odporově. Běžně se využívá slitina v tepelně zpracovaném stavu, kdy se TZ skládá z ohřevu na teplotu 1177°C následovaného rychlým ochlazením. Pro žíhání, při kterém se vyžaduje lesklý povrch, se využívá ochlazování ve vodíku. Tvrdost materiálu se pohybuje kolem 90 HB pro žíhaný i svařovaný materiál. Pro obrábění se doporučuje rychlost cca 0,64 m/s pro destičky z SK a použití procesních kapalin. Slitina nevykazuje povrchové zpevnění při procesu obrábění. HASTELLOY X má širokou škálu použití například pro části plynových turbín, průmyslových pecí, přechodových kanálů, spalovacích komor, plamenových hořáků, výfukových potrubí, ale také v chemickém průmyslu. Hlavně se doporučuje použití pro

průmyslové pece díky své výborné odolnosti proti oxidaci za vysokých teplot. Navíc, jak uvádí lit. [12], materiál zůstává v dobrém stavu i po vystavení teplotě 1177°C po 8700 hodin. [12],[16],[18]

Tabulka 16: Mechanické vlastnosti slitiny HASTELLOY X v závislosti na teplotě:^[16]

Teplota [°C]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
-196	-	1036	46
-78	-	819	51
20	379	767	44
538	245	614	49
649	581	244	54
760	463	237	53
871	310	194	59
982	177	91	66
1093	97	43	60

Pozn.: Hodnoty uvedeny pro tepelně zpracovaný plech

3.5.4 HASTELLOY C-263

Vytvrditelný materiál s přídavkem titanu (~2%) a molybdenu (~5,8), jehož základ tvoří struktura Ni-Cr-Co, kde obsahy Cr a Co se pohybují kolem 20%. Slitina se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi po vytvrzení (**tab. 17**). Má výbornou odolnost proti oxidaci do teplot cca 982°C a pevnost do cca 816°C. Velkou výhodou oproti jiným superslitinám je, že C-263 obvykle nevykazuje vznik únavových trhlin v důsledku dlouhodobého namáhání. Má také velmi dobrou tažnost a je vhodná pro tváření za tepla i za studena (zvláště v žíhaném stavu). Doporučované teploty pro tváření za tepla jsou 955-1150°C. Výborná je také svařitelnost materiálu. Využívá se metod klasických pro niklové superslitiny, a také je doporučováno svařování elektronovým paprskem a naopak není vhodné svařovat plamenem. Při svařování se vyžaduje použití plněného drátu. Tepelné zpracování je rozdílné vzhledem k faktu, je-li k výrobě použité tváření za studena nebo za tepla. Při tváření za tepla se doporučuje ohřev na 1150°C po dobu 0,5 hodiny a následně ochlazení na vzduchu nebo kalení ve vodě a poté vytvrzení za teploty 800°C po dobu 8 hodin s ochlazením na vzduchu. Pokud bude použito tváření za tepla, je vhodné při žíhání upravit čas výdrže na teplotě na 3-5 minut s chlazením ve vodě. Další postup je shodný (pozn. popsání TZ se využívá při zpracování plechů). Obrábění je obdobné jako u výše popsaných vytvrditelných slitin. Tvrdost se pohybuje kolem 200HB. Materiál se běžně využívá pro části leteckých a turbínových motorů, nízkoteplotních spalovacích komor, přechodových vložek apod. Zvláštním použitím tohoto materiálu je, že se využívá pro svařování odlitků ze slitiny GTD-222. [12],[16],[18]

Tabulka 17: Mechanické vlastnosti slitiny HASTELLOY C-263^[16]

Teplota [°C]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
20	580	973	39
780	403	541	9

Pozn.: Hodnoty uvedeny pro tepelně zpracované pásy z C-263

3.6 Slitiny INCONEL

Materiály se základní maticí Ni-Cr. Charakteristické jsou většími koncentracemi Ni (až 72%). Chrom je zastoupen běžnými koncentracemi (12 - 25%). Železo se u těchto materiálů používá méně než u výše popsaných slitin INCOLOY. Maximální obsahy se pohybují kolem 22%. V některých slitinách se Fe nevyskytuje vůbec (př. INCONEL – X750). Ostatní legury jsou Mn, W, Nb, Al, Ti, Co, Mo případně Ta. Jejich obsahy se pohybují většinou v procentech (**tab. 20**), za zmínku stojí vyšší množství kobaltu a molybdenu (Co až 15% a Mo až 14,5%). Slitiny se cení hlavně pro výborné žárovevné vlastnosti, právě proto se používají nejběžněji na lopatky leteckých a turbínových motorů. INCONEL ale nejsou jen značkou žárovevných materiálů, zahrnují také materiály žáruvzdorné s výbornými korozivzdornými vlastnostmi.^{[14],[18]}

3.6.1 INCONEL 600

Základní slitina s přídavkem železa (6 - 10%) a manganu (kolem 1%). Dále může obsahovat maximálně 0,5% křemíku. Má dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot a vyniká svojí velkou rozmanitostí provozních teplot. Může být použita v teplotách hluboce pod bodem mrazu až do vysokých teplot kolem 1093°C. Slitina je nemagnetická. Díky vysokému obsahu niklu (až 72%), který v kombinaci s chromem dodává materiálu velmi dobrou korozní odolnost proti organickým i anorganickým sloučeninám, zvláště v prostředí ve kterém se vyskytují chlor a chlorovodík. Vykazuje velmi dobrou odolnost proti korozní napětíovému praskání v oblastech s vysokými koncentracemi chloridů. Úspěšně se používá i v místech s alkalickými roztoky nebo sloučeninami síry. Slitina se dá lehce tvářet za tepla i za studena. Pro kování jsou doporučeny teploty 870-1230°C. Je potřeba vyhnout se teplotám 650-870°C, protože za těchto teplot má slitina nízkou tažnost. Pro obrábění se uvádí, že INCONEL 600 je lépe obrobitelný než ocel ČSN 17 240, která má vyšší houževnatost a tak je třeba dbát na správné řezné podmínky. Svařitelnost je dobrá, zvláště při použití metody TIG a MIG (**obr. 22**). Běžné použití slitiny je díky výborným korozním vlastnostem a dobré pevnosti ($R_m = 550-680$ MPa, pro tyč nebo pruh) zahrnuje chemický průmysl, jádra nukleárních reaktorů, potravinářský průmysl, součásti pecí pro tepelné zpracování, elektronické součásti, části plynových turbín...^{[18],[14],[24],[15],[20]}

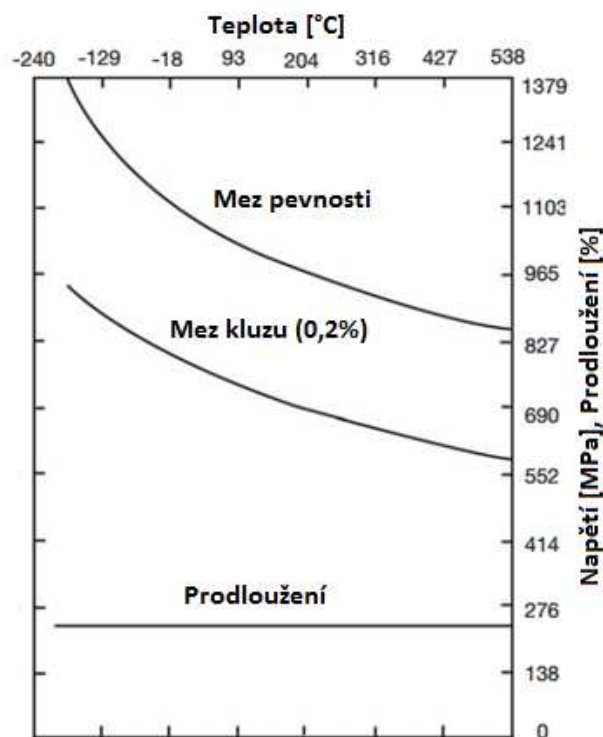


Obr. 22.: Svařenec spojovací příruby z materiálu IN 600^[20]

3.6.2 INCONEL 625

Materiál s velkým přídavkem molybdenu (8 - 10%) a niobu (běžně se uvádí Ni+Ta = 3,15-4,15), může obsahovat i železo (do 5%) a kobalt do jednoho procenta. Díky velkým obsahům Mo a Nb má materiál vysokou pevnost a to jak za teplot hluboko pod bodem mrazu, tak i za vysokých teplot (**obr. 23**). Vysoká je také odolnost proti korozně-napětíovému praskání, hlavně v oblastech obsahujících chloridy. Slitina má vysokou creepovou odolnost, vynikající únavovou a tepelně-únavovou pevnost. Odolnost proti oxidaci dovoluje použití materiálu do teploty kolem 982°C. Materiál vykazuje vysokou houževnatost a tažnost i za velice nízkých teplot ($KC = 45,5$ J pro teplotu $T = -196^\circ\text{C}$). Kombinace molybdenu a niobu je také zodpovědná za zlepšenou odolnost proti šterbinové a důlkové korozi. INCONEL 625 se uvádí jako výborná volba pro použití v mořské vodě. Protože se jedná o žárovevnou slitinu, její zpracování tvářením za tepla je komplikovanější. Lze tvrdit, že materiál lze dobře tvářet za tepla, pokud je k tomu použito zařízení, které dokáže vyvodit vhodné (vysoké) tlaky. Teplota

ohřevu by měla být co nejbližší teplotě 1176°C, ale nesmí být vyšší. Při vyšších teplotách totiž slitina tvoří na svém povrchu velice přilnavou vrstvu oxidů a vzniká nebezpečí zapracování okujené vrstvy do materiálu. Ohřev by proto měl probíhat ve vakuové peci. Pro menší přetvoření lze snížit teplotu materiálu k hranici 930°C. Tváření za studena je možné konvenčními metodami, i ze se musí dbát na velkou pevnost materiálu a na vysoké zpevňování slitiny při tváření (**obr. 7**). Svařitelnost je dobrá, jak tvrdí [18] dá se INCONEL 625 snadno spojovat snad všemi druhy svařování. Díky výše popsaným vlastnostem je použití slitiny velice rozmanité a je to například: těžba ropy z mořského dna a průzkum hlubokých míst oceánu, doprava ropy z míst s nepříznivými klimatickými podmínkami (sibiř), jádra a části nukleárních reaktorů, potrubní a výfukové systémy leteckých proudových motorů a další...^{[18],[14],[24]}



Obr. 23.: Mechanické vlastnosti slitiny IN 625 v závislosti na teplotě^[14]

3.6.3 INCONEL 718

Slitina legovaná převážně stejnými prvky jako INCONEL 625 ovšem jejich množství se výrazně liší. Obsah železa je daleko vyšší (až 18,5%), obsah Mo je snížen na 3% a Nb + Ta cca 5%. Dále je zde můžeme pozorovat v malém množství prvky Ti (0,6-1,2%) a Al (0,2-0,8%), díky kterým materiál po vytvrzení obsahuje primární fázi γ' . INCONEL 718 se vyznačuje vysokou mezí pevnosti ($R_m \sim 1000$ MPa při 20 °C) a vynikající odolností proti tečení do teplot kolem 705 °C a proti oxidaci kolem 980°C. Korozivzdorné vlastnosti jsou obdobné jako u slitiny IN 625. Absence většího množství Mo může způsobit větší náchylnost k šterbinové nebo důlkové korozi. Při tváření za tepla patří materiál k jednomu z těch nejhůře tvárných vzhledem k jeho vysoké pevnosti. IN 718 lze tvářet za teplot asi 900-1120°C s použitím výkonných strojů, které budou schopny vytvořit dostačující tlaky. Pro ohřev se doporučuje použít lehce redukční atmosféru obsahující malé množství CO. Tváření za studena není problémem, lze použít klasické metody tak jako pro oceli. Obrábět se slitina dá, ale musí se dbát na velkou pevnost, zpevnění a tvrdost materiálu, která může dosahovat až cca 425 HV. Tepelné zpracování je možno provádět dvěma způsoby a to: ^{[18],[14],[10],[24]}

- 1. Žihání za teploty 940-1010°C a následné ochlazení na vzduchu. Poté následuje vytvrzení při 720°C s ochlazováním asi 35°C za hodinu na 620°C, při dosažení této teploty následuje setrvání minimálně po 8 hodin a ochlazení na vzduchu,
- 2. Žihání za teploty 1037-1065°C a následné ochlazení na vzduchu. Dále vytvrzení při teplotě 760°C po 10 hodin a ochlazení v peci na 650°C, po dosažení této teploty následuje setrvání minimálně po dobu 20 hodin a ochlazení na vzduchu.

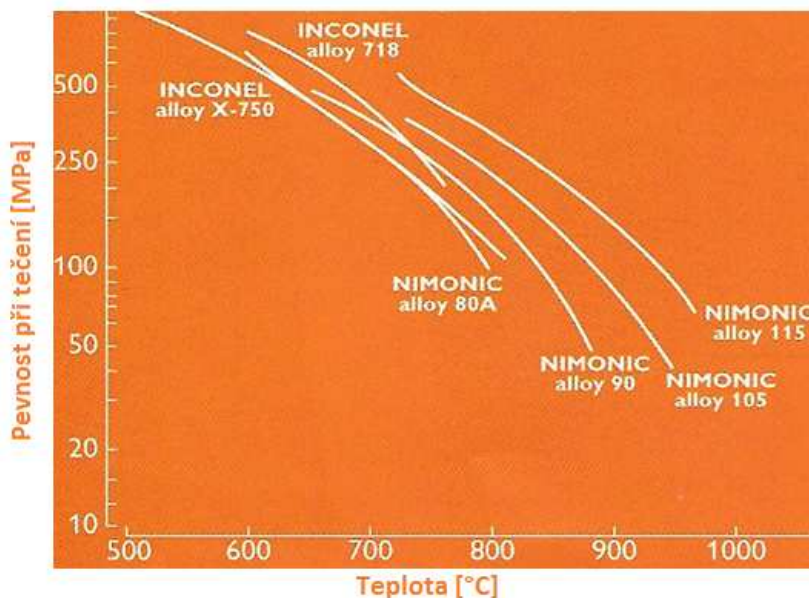
Uvádí se, že tepelné zpracování 1 se používá k dosažení nejvyšších pevnostních a únavových charakteristik při pokojové teplotě. Tepelné zpracování 2 se používá v případech, kdy je

materiál určen pro pracovní oblasti nízkých a velmi nízkých teplot. Tepelné zpracování 2 dodává slitině velmi dobré hodnoty při příčné zkoušce tahem a při zkoušce vrubové houževnatosti. Nevýhodou tohoto způsobu TZ může být větší náchylnost materiálu k vrubové křehkosti při napětovém praskání.

Materiál dosahuje vyšších mechanických vlastností při kombinaci tváření za studena a následném tepelném zpracování než pouze ve vytvrzeném stavu.

INCONEL 718 je jedna z nejpoužívanějších žárovevých slitin používaných na plynové turbíny, proudové motory, části reaktorů, skladování plynů za kryogenních teplot (tekutý dusík) aj.

[18],[14],[10],[24]



Obr. 24.: Pevnost při tečení v závislosti na teplotě různých žárovevých slitin (pro dobu 1000 hodin)^[8]

3.6.4 INCONEL X-750

Slitina je chemickým složením obdobná jako IN 600, díky tomu má obdobné i korozní vlastnosti v oxidačních a redukčních prostředích a odolnost proti oxidaci za vysokých teplot. Velmi se cení také odolnost proti korozně napětovému praskání v oblastech, které obsahují chloridy. Díky přísadám hliníku (0,4-1%), titanu (2,2-2,75%) a niobu (resp. Nb+Ta=0,7-1,2%) je ale na rozdíl od výše zmíněného materiálu vytvrditelná a její mechanické vlastnosti se tak výrazně zlepšují. Vyznačuje se vysokou creepovou pevností do teploty cca 700°C. Pokud je teplota vyšší než 700 °C, vytrácí se účinek precipitačního vytvrzování. Uvádí se ovšem, že pokud je provedeno vhodné tepelné zpracování, dá se materiál s dobrou pevností používat až do teploty 832 °C (kde $R_m \sim 530$ MPa). Tepelné zpracování je u této slitiny komplexnějším problémem. Může se použít několik možných řešení v závislosti na požadovaných vlastnostech, ale také se rozděluje vzhledem k tvaru materiálu. Jiné zpracování se používá v případě pásů a plechů, tak jako v případě tyčí či pruhů. Tak jako ostatní materiály značky INCONEL vykazuje výborné vlastnosti za kryogenních teplot. Slitina se dá zpracovávat všemi druhy tváření za tepla (doporučený interval teplot je 980-1200 °C) i za studena. Tak jako IN 718 a IN 625 se při tváření za studena velice rychle zpevňuje (obr. 7). Vzhledem k vysoké pevnosti (R_m až 1250 MPa, Tvrdost až 40 HRC po vytvrzení) se slitina běžně obrábí před vytvrzením a následně po tepelném zpracování se dělají pouze dokončovací operace. Tento postup má pozitivní vliv na únavovou pevnost materiálu. Spojování materiálu pomocí svařování je dobré. Běžně používané metody jsou TIG, elektronový paprsek, plasma a odporové svařování. Pro svoje výborné vlastnosti se materiál používá zvláště pro velice namáhané části proudových motorů (rozváděcí lopatky), plynových turbín, letadlových součástí, ale také pro tlakové nádoby apod...^{[18],[14],[10],[20]}

3.6.5 INCONEL 713 C, IN 713 LC

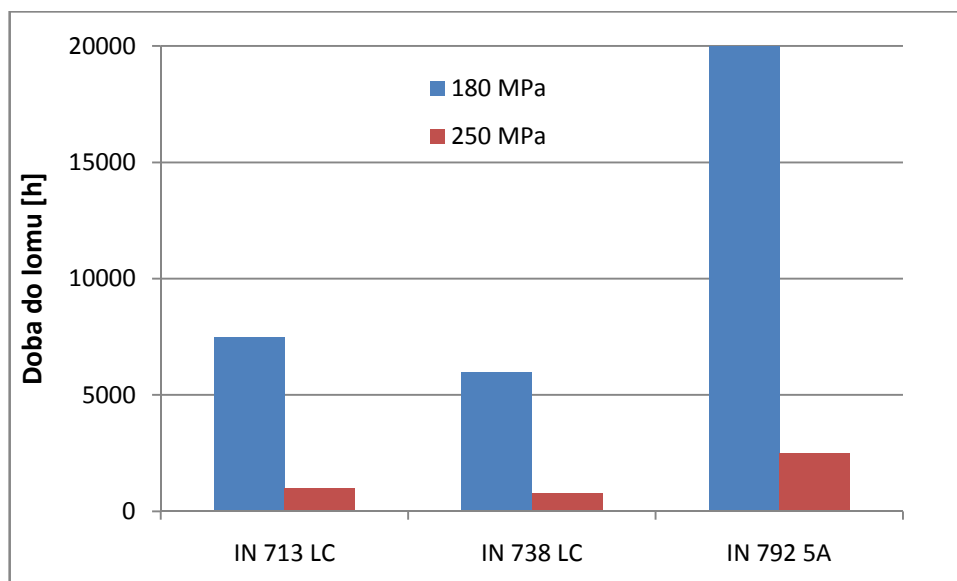
INCONEL 713 C je komplexně legovaný materiál. Základní matrice je zpevněna molybdenem (4,2%). Největší vliv na zpevnění u této slitiny má vysoký přírůstek hliníku (až 6,1%). Dále obsahuje nižší množství titanu (~0,8%) a také niobu (~2%). Tato slitina se vyznačuje výbornými pevnostními vlastnostmi do teploty cca 980 °C, jak ukazuje krátkodobá zkouška pevnosti při tečení, kterou provádí SVÚM pro řadu zákazníků (**tab. 18** – v tabulce uvedeny různé příklady). I za takto vysokých teplot má materiál stále velice dobrou odolnost proti oxidaci, dobrou odolnost proti tepelné únavě a vynikající strukturní stabilitu. Materiál byl původně určen k odlévání na vzduchu, kdy se dále počítalo s následným přetavením v argonové atmosféře [25]. Vzhledem k nástupu vakuové metalurgie počátkem 50 let 20. století se slitina zařadila mezi první materiály, které se začaly touto metodou odlévat. Běžně se slitina používá pouze ve stavu litém. Pro zlepšení napětového praskání za vysokých teplot cca 920 – 1030 °C se doporučuje tepelné zpracování po dobu 2 hodin za teploty ~ 1176 °C buď ve vakuu, nebo v ochranné atmosféře argon a následovně ochlazení na vzduchu. U takto zpracovaného materiálu byl ovšem pozorován výrazný pokles tažnosti a meze únavy. Pokud by bylo zpětně požadováno lepších vlastností pod teplotou 920 °C je řešením tepelné zpracování po dobu 16 hodin na teplotě cca 920 °C s následným ochlazením na vzduchu. Co se týče spojování materiálu, uvádí se INCONEL 713 C je slitina nedoporučovaná ke svařování. Pokud se svařuje, tak metodou TIG s plnicím drátem daného chemického složení, nebo metodou elektronového svařování, která může vytvářet velice kvalitní svary bez trhlin a s velice dobrými tahovými vlastnostmi. Téměř stejnou slitinou je **INCONEL 713 LC** (Low Carbon), který se liší nízkou hodnotou uhlíku (**viz. tab. 20**). Snížení obsahu C způsobuje posun solidu a likvidu k vyšším teplotám (**tab. 19**) a také zlepšení některých materiálových charakteristik (hlavně plasticity). Obě slitiny jsou technologicky nenáročné a mají celkem jednoduché legování. I když jsou velice staré, mají řadu výhod a zůstávají tak z hlediska množství nejvíce vyráběnými niklovými slitinami. Vzhledem k výše popsaným vlastnostem se oba materiály používají převážně jako nejnamáhanější součásti leteckých motorů a spalovacích turbín jako jsou rozváděcí lopatky, oběžné lopatky, oběžná kola turbokompresorů a další...^{[25],[7]}

Tabulka 18. Podmínky atestačních creepových zkoušek a minimální požadované vlastnosti vybraných superslitin^[7]

			Minimální požadavky		
Slitina	Teplota [°C]	Napětí [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
IN 713 LC	980	150	30	4	-
	870	353	29	3,5	-
	760	530	50	2	-
IN 738 LC	982	152	35	5	10
	930	230	20	-	-
	760	545	60	-	-
IN 792 5A	950	230	16	5	5
	850	400	30	3,5	-

3.6.6 INCONEL 738, IN 738 LC

IN 738 je vytvrditelná superslitina s malými přísadami wolframu, molybdenu, niobu a tantalu (**tab. 20**). Ve větší míře jsou zastoupeny titan, hliník (Al,Ti = 3,4%) a kobalt (8,5%). Díky vyšším obsahům Ti a Al se slitina zpracovává takřka výhradně odléváním ve vakuových pecích. Pevnostní charakteristiky jsou obdobné jako u výše popsaných slitin IN 713 (LC)



Obr. 25.: Provnání životnosti uvedených superslitin při teplotě 850 °C a uvedeném napětí^[7]

(obr. 25). Výhodou oproti IN 713 (LC) je zvýšená odolnost proti vysokoteplotní korozi a to zejména v sirném prostředí. Toho se dosahuje právě pomocí vyšších obsahů příměsových prvků (tab. 20), zejména chromu. Nevýhodou zvýšeného obsahu Cr a ostatních prvků je náchylnost slitiny k tvorbě nežádoucích TCP fází během provozu, a tak je nutno optimalizovat složení slitiny. V potaz se ale musí brát i fakt, že při tomto legování se také zvyšuje měrná hmotnost slitiny (tab. 19), což je např. u leteckých motorů nevhodné. S vyšším obsahem deficitních prvků se zvedá i cena slitiny. Při srovnání s IN 713 (LC) je cena IN 738 asi o polovinu vyšší. K dosažení vhodných vlastností slitiny je nutné tepelné zpracování. Běžně se používá TZ za teploty 1120 °C po dobu 2 hodin s ochlazením na vzduchu a následně ohřev na teplotu 840 °C s výdrží 24 hodin s ochlazením opět na vzduchu. Obrábění materiálu je podobné jako u výše popsaných superslitin a co se týče svařování, je takřka stejné jako u IN 713 (LC). **INCONEL 738 LC** se liší opět jen ve sníženém obsahu. Tyto výhody jsou popsány výše.^{[25],[7]}

Tabulka 19. Vybrané fyzikální vlastnosti^[7]

Slitina	Teplota [°C]		Měrná hmotnost [g/cm]
	Solidu	Likvidu	
IN 713	1260	1288	7,91
IN 713 LC	1288	1321	8,01
IN 738 LC	1230	1315	8,11
IN 792	1235	1320	8,25

3.6.7 INCONEL 792 (5A)

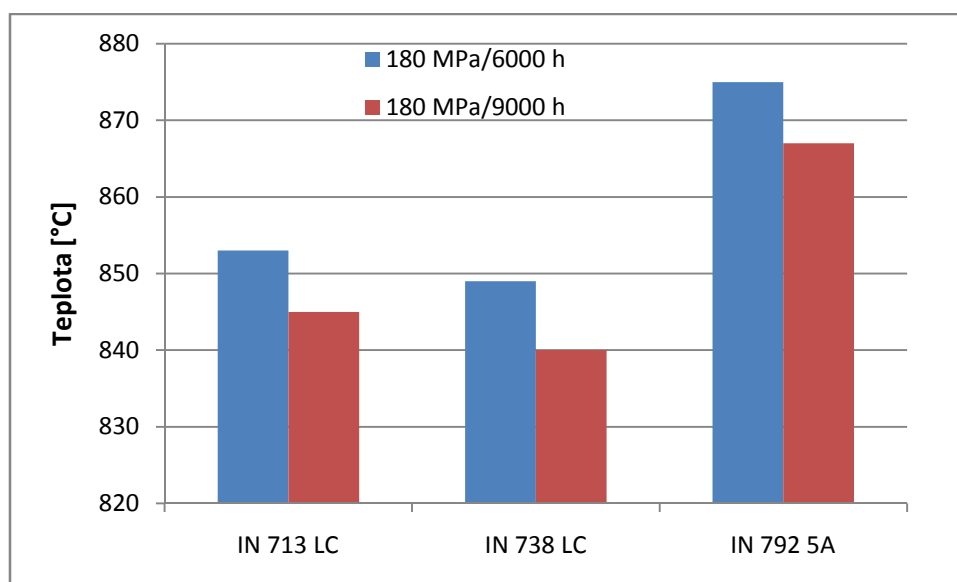
Materiál, jenž je chemickým složením velice podobný slitině IN 738 LC. Liší se zvláště nižším obsahem chromu (viz tab. 15), a vyššími koncentracemi titanu (4,5%) a tantalu (4,17%). Touto kombinací vzniká materiál, který má žáruvzdornost téměř stejnou jako IN 738 LC, ale získává vyšší žárupevnost (obr. 25, obr. 26). Vysoké koncentrace prvků Ti a Ta způsobují, že vyloučený objemový podíl fáze γ' v materiálu dosahuje 45-55%. Takovýto materiál se téměř nedá tvářet a je s obtížemi obrobitelný. Běžná metoda výroby je tedy vakuové lití nebo lze použít metodu práškové metalurgie. Svých nejlepších mechanických vlastností dosahuje materiál po tepelném zpracování. Pro slitinu je doporučeno několik vhodných metod TZ:

→ TZ stejné jako u slitiny IN 738 LC,

- Třístupňové TZ 1120 °C/2 h/vzduch + 1080 °C/4 h/vzduch + 845 °C/4 h/vzduch,
 → Třístupňové TZ 1120 °C/2 h/vzduch + 840 °C/4 h/vzduch + 760 °C/4 h/vzduch.

Podrobný popis tepelného zpracování a dosahovaných vlastností uvádí lit. [4]

Slitina IN 792 má ze všech výše popsanych slitin největší žírupevnost. Vyniká také výbornou žíruvzdorností v sirnatých prostředích. Při provozu je ovšem, tak jako IN 738, náchylná k tvorbě TCP fází a musí se také optimalizovat její chemické složení. Další nevýhodou je největší měrná hmotnost v porovnání s výše uvedenými materiály (**tab. 19**). Pokud se zaměří pozornost na cenu, dle lit. [7] je IN 792 asi trojnásobně dražší než IN 713 LC. ^{[25],[7],[4]}



Obr. 26.: Porovnání vybraných slitin při zvoleném napětí a životnosti z hlediska teplotního^[7]

Tabulka 20. Chemické složení popsanych slitin značky INCONEL:^{[7],[18]}

Slitina	Prvek [%]												
	C	Cr	Fe	Co	Mo	W	Nb	Ta	Ti	Al	Zr	B	Ni
IN 600	max. 0,15	14,0-17,0	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	min 72
IN 625	max. 0,10	20,0-23,0	max 5	max 1,0	8,0-10,0	-	3,15-4,15 (Nb+Ta)		max. 0,40	max. 0,40	-	-	min 58
IN 718	0,08	17,0-21,0	zbytek	1,0	2,8-3,3	-	4,75-5,50	0,05	0,65-1,15	0,20-0,80	-	-	50-55
IN X-750	max. 0,08	14,0-17,0	5-9	max 1,0	-	-	0,70-1,20 (Nb+Ta)		2,25-2,75	0,40-1,00	-	-	min 70
IN 713 C	0,12	12,5	-	-	4,2	-	2,00	-	0,80	6,10	0,10	0,012	zákl
IN 738	0,17	16,0	-	8,5	1,7	2,60	0,90	1,70	3,40	3,40	0,10	0,010	zákl
IN 792	0,12	12,4	-	9,0	1,9	4,17	-	3,9	4,50	3,37	0,03	0,015	zákl

4 SLITINY Ni SE ZVLÁŠTNÍMI FYZIKÁLNÍMI VLASTNOSTMI

4.1 Termočláňkové slitiny

Tyto slitiny se využívají k měření teplot. Fyzikální podstatou měření je Seebeckův jev. Ten popisuje situaci, kdy uzavřený obvod, který tvoří dva různé elektrické vodiče na obou koncích spojené, má v obou těchto spojích různou teplotu a tím pádem obvodem protéká elektrický proud. Materiály pro tyto obvody musí splňovat určité fyzikálně-chemicko-technologické vlastnosti, jako jsou:^{[13],[17],[5],[1]}

- Vznik velkého termoelektrického napětí
- Závislost na teplotě, která se co nejvíce blíží závislosti lineární
- Odolnost proti korozi, chemickým a mechanickým vlivům a vysokým teplotám
- Stabilita časových a teplotních charakteristik
- Zpracovatelnost na drát

Tab.4.: Slitiny Ni používané pro termočláňky^{[17],[5],[1]}

Chemické složení [%]	Druh slitiny	Rozsah použití [°C]
(9-12)Cr, zbytek Ni	Chromel	0-1000
1,5Si+2Mn+2,2Al, zbytek Ni	Alumel	0-1300
2Mn+58Cu+40Ni	Konstantan	300-1000
0,5Mn+56,5Cu+43Ni	Kopel	-200-800

4.2 Odporové slitiny Ni

Binární slitiny na bázi Ni-Cr, kde se používá asi 20% Cr. Materiál je homogenní, tvárný, vhodný k výrobě drátů a tyčí. Používá se většinou na výrobu topných odporů do teploty asi 1150°C. S vyšším obsahem chromu se zvyšuje i žáruvzdornost a žárupevnost. Nikl jako deficitní prvek, může být nahrazen železem, to však je do 25%Fe. Přísada železa navíc zvyšuje odolnost proti působení síry a dále snižuje škálu teplotního použití materiálu do teplot asi 1000°C. Tyto slitiny se vyrábí s různým chemickým složením pod názvy Chromnikl, Nichrom, Pyrochrom, Chronit...^{[5],[17]}

4.3 Magneticky měkké slitiny Ni

Krom niklu jsou charakteristické tyto tzv. Permaloy velkým rozpětím obsahu železa a to 22-64[%]. Dalšími legujícími prvky zastoupenými v menší míře jsou měď, chrom, molybden a křemík. Jak už název napovídá, výborných magnetických vlastností, zvláště vysoké a stálé permeability, se dosahuje použitím velice čistých použitých prvků spojených s náročnou výrobní technologií, to se samozřejmě odráží v dané ceně materiálů. Použití je omezeno na měřicí přístroje a zařízení, jádra transformátorů apod...^{[17],[5]}

Permaloye můžeme rozdělit dle druhu slitin:^[17]

- Binární slitiny (50Ni+50Fe)%, (30Ni+70Fe)%
- Ternární slitiny (80Ni+5Mo+15Fe)%, (80Ni+4(Cu+Cr)+16Fe)%

Tab.5.: Normované magneticky měkké slitiny niklu v ČR:^[5]

Označení	Norma ČSN
NiFe63	42 3481
NiFe48	42 3482
NiFe49	42 3484
NiFe17CuCr	42 3480
NiFe16CuCr	42 3483
NiFe15CuCr	42 3487

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést přehled niklových slitin používaných ve všech odvětvích dnešního průmyslu, ale zvláště slitin korozivzdorných, žáruvzdorných a žárovevných. Práce je zaměřena na rozbor základních tržních značek těchto materiálů. Popisuje jejich mechanické, technologické, fyzikální a korozní vlastnosti za běžných podmínek i za zvýšených teplot.

U slitin niklu se za cca 115 let své výroby a průmyslového využití markantně měnilo chemické složení, výroba i mechanické vlastnosti. První materiály na bázi niklu byly Monelové slitiny, vyrobené začátkem 20. století. V důsledku rozvoje leteckého průmyslu a turbínových motorů na začátku 2. světové války byla potřeba vývoje materiálů, které jsou odolné vysokým teplotám a korozním atmosférám. Vznikaly tak první žárovevné materiály legované wolframem, chromem, vanadem, molybdenem a prvky Ti, Al, Nb či Ta, které umožňovaly vytvrzení a vznik intermetalické fáze γ' a γ'' . Další zlepšování vlastností bylo dosahováno pomocí optimalizace chemického složení (použití legur B a Zr), zdokonalováním technologie tavení a odlévání (zvláště pak zavedení vakuové metalurgie), tváření a tepelného zpracování. Zvýšení teplot leteckých motorů a plynových turbín pro dosažení vyšší účinnosti se dále umožnilo výrobou turbínových lopatek vnitřním chlazením a odlitků s řízenou krystalizací tvořených usměrněnými komlunárními zrny až po monokrystalické odlitky.

K modernějším technologiím pro zpracování superslitin patří kování v horkých, indukčně ohřívaných zápustkách, izotermické tváření, kdy má tvářený materiál stejnou teplotu jako zápustka a tváření v superplastickém stavu. Rozšiřuje se také metoda práškové metalurgie, pro příklad: výroba turbínového disku, kdy se materiál rozstříkuje v proudu inertního plynu. Co se týče mikrostruktury, je dnes možnost materiály zpevňovat disperzně, legurami jako jsou oxid yttria nebo oxid thoria (ThO_2 , YO_2) namísto využití precipitačního zpevnění. Využívá se též jejich kombinací

Mimoto jsou niklové superslitiny špičkové materiály, které jsou pro světový průmysl nepostradatelné. Využívají se pro kriticky namáhané konstrukce a provozu až už při konstrukci letadel, kosmických lodí nebo hlubinných ropných vrtů. Jejich výroba a legování jsou velice nákladné a většina firem má své vlastní technologické postupy pro dosažení nejlepších vlastností. Vzhledem k využití je nutno materiály zkoušet a výsledky vyhodnocovat velice pečlivě. V případech, kdy jsou součásti užity pro výrobu letadel nebo pro těžbu na ropných plošinách, je dokumentace o procesu výroby uchována pro případ havárie a následné dohledání příčin. Použití superslitin je tudíž ekonomicky omezeno pouze pro nezbytné případy.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkačka	Název	Jednotka
ρ	Hustota	[kg/m ³]
T_T	Teplota tání	[°C]
λ	Tepelná vodivost	[W/(m × k)]
G	Elektrická vodivos	[s/m]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_e, (R_{e0,2})$	Mez kluzu	[MPa]
A	Prodloužení	[%]
δ	Misfit	[%]
γ	Základní fáze	[-]
γ'	Primární intermetalická fáze	[-]
γ''	Sekundární intermetalická fáze	[-]
$\alpha_{\gamma'}$	Mřížkový parametr precipitátů	[-]
α_{γ}	Mřížkový parametr fáze γ	[-]
a	Korozní rychlost	[mm]
KCU (KCV)	Nárazová práce	[J]
T	Teplota	[°C]
BCC	Kubická mřížka prostorově středěná	[-]
FCC	Kubická mřížka plošně středěná	[-]
HB	Tvrdost dle Brinella	[HB]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[HV]
HRB, HRC	Tvrdost dle Rockwella	[HRB, HRC]

POUŽITÁ LITERATURA

1. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3070-2.
2. DAVIS, J. R. *Nickel, cobalt, and their alloys* [online]. 1. Materials Park, OH: ASM International, c2000 [cit. 2017-02-22]. ISBN 08-717-0685-7. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=IePhmnbmRWkC&oi=fnd&pg=PA3&dq=nickel+cobalt+alloys&ots=kokeQGJ8ND&sig=5Hy4r_P_Xf0SACDL08pkRxiwGlo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
3. HEMALA, Robert. *STANOVENÍ VHODNÉHO TVARU ZKUŠEBNÍCH TYČÍ PRO ODSTRANĚNÍ VNITŘNÍCH VAD OVLIVŇUJÍCÍCH TESTOVÁNÍ NÍZKO- A VYSOKOCYKLOVÉ ÚNAVY*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Ňuksa.
4. PODHORNÁ, Božena, Jiří KUDRMAN a Karel HRBÁČEK. MECHANICKÉ VLASTNOSTI A STRUKTURNÍ STABILITA NIKLOVÉ SLITINY IN 792 – 5A. In: *METAL 2014* [online]. Brno: TANGER, 2014 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_06/papers/65.pdf
5. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
6. ŠMÍD, Karel. *SOUČASNÉ PŮSOBNÍ ÚNAVY A CREEPU U Ni SUPERSLITIN A SLITINY TiAl*. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. RNDr. KAREL OBRTLÍK, CSc.
7. Žárupevné vlastnosti vybraných niklových slitin. *Slévárenství*. 2006, **2006**(12), 444-452.
8. *Vysokoteplotní slitiny*. ČVUT, Fakulta strojní, 2014. Dostupné také z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/>
9. Brisk Classic. In: *Brisk* [online]. Vožická 2068, 390 02 Tábor: Brisk, 1992 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.brisk.cz/katalogy/zapalovaci-svicky/classic%2021.2.2017>
10. Nickel & High Temperature Alloys. *Aircraft Materials* [online]. Stokenchurch: Aircraft Materials, 2013 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/nickal.html>
11. Niklové slitiny. *BIBUS* [online]. Brno: BIBUS, 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf
12. All Alloys. *HPA Alloys* [online]. Windfall: HPA Alloys, 2014 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.hpalloy.com/alloys/>
13. Technická univerzita v liberci: Katedra materiálu. *Studijní podklady: Nauka o materiálu II* [online]. Technická univerzita v liberci: Katedra materiálu, 2010 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.kmt.tul.cz>
14. Nickel Alloys. <http://www.specialmetalswiggins.co.uk> [online]. Hereford: Special Metals & PCC company, 2017 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.specialmetalswiggins.co.uk/products/by-alloy>

15. SPECIFIKACE NEREZOVÝCH MATERIÁLŮ. *ARMAT* [online]. Czech Republic: ARMAT, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
16. Niklové slitiny - niklové plechy, tyče, trubky, dráty, příruby. *INKOSAS* [online]. Praha: INKOSAS, 2014 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/templates/niklove-slitiny-tyce-plechy-draty-trubky.php>
17. Katedra materiálů a strojírenské metalurgie. *Strojírenské materiály: Nikl a jeho slitiny + Titan a jeho slitiny* [online]. Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni: Oddělení povrchového inženýrství, 2008 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz>
18. Nickel & High Temp Alloys. *Continental Steel & Tube Company* [online]. Fort Lauderdale, FL, 33303: Continental Steel & Tube Company, 2017 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://continentalsteel.com/nickel-alloys/>
19. AMERICAN ELEMENTS. *Nickel Manganese Alloy* [online]. 1093 Broxton Ave. Suite 2000, Los Angeles, CA 90024 USA: American Elements, 2017 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <https://www.americanelements.com/>
20. Alloys. *Corrosion Materials* [online]. Houston, Texas: Corrosion Materials, 2015 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.corrosionmaterials.com/alloys/>
21. Nickel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>
22. NICKEL BERYLLIUM ALLOY 360. *MATERION* [online]. 6070 Parkland Boulevard, Mayfield Heights, OH 44124 USA: MATERION CORPORATION, 2013 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <https://materion.com/products/alloys/nickel-beryllium-alloys/alloy-360>
23. Monel Valve. In: *IndiaMART* [online]. Noida, Indie: IndiaMART, 2017 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <https://dir.indiamart.com/impcat/monel-valve.html>
24. *AZO Materials* [online]. London: AZO Materials, 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.azom.com/>
25. High Nickel Alloys & Superalloys. *Nickel Institute* [online]. Toronto, Ontario: Nickel Institute, 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://www.nickelinstitute.org/NickelUseInSociety/MaterialsSelectionAndUse/Ni-ContainingMaterialsProperties/HighNickelAlloysAndSuperalloys.aspx>
26. Nickel-Chromium (Ni-Cr) Phase Diagram. In: *Computational Thermodynamics* [online]. USA: Computational Thermodynamics, 2011 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.calphad.com/nickel-chromium.html>
27. Dubajské kontrakty GE Aviation. In: *Http://www.planes.cz* [online]. Brno: GE Aviation, 2007 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.planes.cz/cs/article/100351/dubajske-kontrakty-ge-aviation>